

N° D'ORDRE

1362.

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES,

PAR M. JULES BAILLAUD.

1^{re} THÈSE. — LA MÉTHODE DE L'ÉCHELLE DE TEINTES EN PHOTOMÉTRIE
PHOTOGRAPHIQUE : APPLICATION A L'ÉTUDE DE L'ÉTALON
LUMINEUX A ACÉTYLÈNE.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 10 JUIL 1914 devant la Commission d'Examen.

MM. BOUTY, *Président.*
URBAIN, *Examineurs.*
PUISEUX, }

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS ET C^{ie}, IMPRIMEURS-LIBRAIRES

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,

Quai des Grands-Augustins, 55.

1914



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41556022_0002

N° D'ORDRE

4562.

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES,

PAR M. JULES BAILLAUD.

1^{re} THÈSE. — LA MÉTHODE DE L'ÉCHELLE DE TEINTES EN PHOTOMÉTRIE
PHOTOGRAPHIQUE : APPLICATION A L'ÉTUDE DE L'ÉTALON
LUMINEUX A ACÉTYLÈNE.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.



Soutenues le 10 JUIL 1914 devant la Commission d'Examen.

MM. BOUTY, *Président.*
URBAIN, } *Examineurs.*
PUISEUX, }

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS ET C^{ie}, IMPRIMEURS-LIBRAIRES

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,

Quai des Grands-Augustins, 55.

1914

UNIVERSITÉ DE PARIS.

FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS.

MM.

Doyen.....	P. APPELL, professeur.	Mécanique analytique et Mécanique céleste.
Doyen honoraire.....	G. DARBOUX.....	Géométrie supérieure.
Professeurs honoraires...	CH. WOLF. RIBAN.	
	LIPPMANN.....	Physique.
	BOUTY.....	Physique.
	BOUSSINESQ.....	Physique mathématique et Calcul des probabilités.
	PICARD.....	Analyse supérieure et Algèbre supérieure.
	YVES DELAGE.....	Zoologie, Anatomie, Physiologie compar.
	GASTON BONNIER.....	Botanique.
	DASTRE.....	Physiologie.
	KOENIGS.....	Mécanique physique et expérimentale.
	VELAIN.....	Géographie physique.
	GOURSAT.....	Calcul différentiel et Calcul intégral.
	HALLER.....	Chimie organique.
	JOANNIS.....	Chimie (Enseignement P. C. N.).
	P. JANET.....	Physique (Enseignement P. C. N.).
	WALLERANT.....	Minéralogie.
	ANDOYER.....	Astronomie.
	PAINLEVÉ.....	Mécanique rationnelle.
Professeurs.....	HAUG.....	Géologie.
	HOUSSAY.....	Zoologie.
	H. LE CHATELIER...	Chimie.
	GABRIEL BERTRAND...	Chimie biologique.
	M ^{me} P. CURIE.....	Physique générale.
	CAULLERY.....	Zoologie (Évolution des êtres organisés).
	C. CHABRIÉ.....	Chimie appliquée.
	G. URBAIN.....	Chimie.
	EMILE BOREL.....	Théorie des fonctions.
	MARCHIS.....	Aviation.
	JEAN PERRIN.....	Chimie physique.
	G. PRUVOT.....	Zoologie, Anatomie, Physiologie compar.
	MATRUCHOT.....	Botanique.
	ABRAHAM.....	Physique.
	CARTAN.....	Calcul différentiel et Calcul intégral.
	CL. GUICHARD.....	Mathématiques générales.
	MOLLIARD.....	Physiologie végétale.
	N.....	Application de l'Analyse à la Géométrie.
	N.....	Histologie.
	PUISEUX.....	Mécanique et Astronomie.
	LEDUC.....	Physique.
	MICHEL.....	Minéralogie.
	HÉROUARD.....	Zoologie.
	LÉON BERTRAND.....	Géologie.
Professeurs adjoints.....	RÉMY PERRIER.....	Zoologie (Enseignement P. C. N.).
	COTTON.....	Physique.
	LESPIEAU.....	Chimie.
	GENTIL.....	Pétrographie.
	SAGNAC.....	Physique (Enseignement P. C. N.).
	PEREZ.....	Zoologie (Évolution des êtres organisés).
Secrétaire.....	D. TOMBECK.	

PREMIÈRE THÈSE.

LA MÉTHODE DE L'ÉCHELLE DE TEINTES EN PHOTOMÉTRIE PHOTOGRAPHIQUE.

APPLICATION A L'ÉTUDE DE L'ÉTALON LUMINEUX A ACÉTYLÈNE.

INTRODUCTION.

Le rapport de deux flux lumineux se déduit de la comparaison des éclairagements qu'ils produisent. Dans les procédés visuels de photométrie, cette comparaison se fait toujours par la méthode d'égalisation; on modifie l'un des flux dans un rapport connu, jusqu'à ce que les deux éclairagements produits soient égaux. L'œil est en effet très apte à juger de l'égalité de deux éclairagements, tandis qu'il ne pourrait estimer dans quel rapport l'un des deux éclairagements est plus grand que l'autre.

Dans les méthodes photographiques de photométrie, l'observateur compare les deux éclairagements d'après leurs effets sur la plaque photographique, c'est-à-dire d'après les masses d'argent réduit qui se sont produites après les opérations du développement. Ces masses sont susceptibles de mesure; de là résultent deux procédés possibles: dans l'un, la plaque remplace simplement l'écran photométrique des appareils visuels, et l'on modifie l'un des flux jusqu'à réaliser l'égalité des masses d'argent réduit et, par suite, des éclairagements qui les ont produites; dans l'autre, on ne modifie pas les flux; on profite des lois qui relient les éclairagements et les durées de pose à l'argent réduit pour déduire du rapport des masses d'argent réduit le rapport des éclairagements, qui peuvent ainsi être inégaux.

Ces lois n'ont malheureusement pas la simplicité qu'on leur a attribuée; surtout elles sont fort différentes d'une plaque à l'autre; aussi leur emploi risque-t-il d'introduire bien des erreurs. La première méthode, au contraire, n'introduit pas plus de difficultés théoriques que les méthodes visuelles.

La seconde méthode date des premières applications de la Photographie : dès 1844, Fizeau et Foucault avaient énoncé, avec beaucoup de réserve d'ailleurs, la loi de réciprocité, dite depuis *de Bunsen et Roscoe*, et l'avaient appliquée à une comparaison photométrique du soleil et de l'arc électrique.

La première méthode est d'une application beaucoup plus récente; en 1894, M. Bouasse avait conclu, d'une étude très étendue sur les plaques alors existantes, qu'elles ne pouvaient servir qu'à la comparaison d'éclairements égaux et qu'on ne devait conclure à l'égalité des deux éclairements que si les deux noircissements égaux résultaient de durées de pose égales. En 1899, M. Hartmann, dans le Mémoire où il décrit son *microphotomètre*, énonce la même règle; il la rend d'une application plus facile en introduisant une échelle de teintes; mais n'ayant en vue que les observations astronomiques, il ne donne pas à cette échelle une disposition susceptible d'éliminer les variations de sensibilité d'un point à l'autre de la plaque.

M. Cotton et M. Camichel, en 1902, aboutissent aux mêmes conclusions que M. Bouasse et M. Hartmann; ils perfectionnent la méthode de l'échelle de teintes en la disposant de manière que les variations de sensibilité de la plaque soient éliminées. M. Camichel poussait son étude au delà des considérations purement théoriques en établissant un procédé expérimental qui en permet l'application.

Dans le cours de la dernière décade, les recherches de photométrie photographique se sont beaucoup multipliées; peu d'entre elles, cependant, ont utilisé des procédés se rapprochant de celui de M. Camichel. On ne peut guère citer que les recherches de MM. J.-C. Parkurst et Jordan en photométrie stellaire; celles de M. P. Koch, de M. C. Brush et de M. Fabry en photométrie de laboratoire.

Le procédé de M. Camichel est le suivant : une plaque photographique coulisse derrière un écran percé d'une petite fenêtre rectangulaire à travers laquelle se font, sur la plaque, les impressions des flux lumineux étudiés. Un obturateur convenable permet de donner à toutes les poses la même durée. A l'aide du premier flux, on impressionne une première série de plages en leur donnant un éclairement variable de l'une à l'autre d'après une loi connue. A l'aide du second flux, on impressionne une seconde série de plages intercalées entre les premières, en leur donnant à toutes le même éclairement. La première

série de plages, que j'appellerai par la suite *échelle de teintes*, permet de tracer la courbe reliant les masses d'argent réduit aux éclairéments qui leur ont donné naissance. La courbe, une fois tracée, permet de déterminer l'éclairement reçu par les plages de la seconde série que j'appellerai désormais *plages intercalées*.

Dans la plupart des méthodes, la précision de la photométrie photographique est limitée par l'irrégularité de la sensibilité des plaques. Dans la méthode de MM. Camichel et Cotton, les plages que l'on compare sont imbriquées les unes dans les autres. Si les phénomènes dont dépend le noircissement final ne varient que d'une façon lente et continue à la surface de la plaque, on n'aura pas à en tenir compte. Je me suis proposé, en particulier, de rechercher jusqu'à quel point cette élimination est réalisée, et de déterminer quelle précision on peut obtenir par l'application rigoureuse de la méthode de l'échelle de teintes, soit dans la photométrie de laboratoire, soit dans la photométrie stellaire.

Dans un premier Chapitre, je décrirai les instruments qui m'ont servi. Dans le second, j'étudierai la précision de la méthode; enfin, dans le troisième, j'en ferai l'application à l'étude d'un étalon lumineux à acétylène (1).

(1) Les études relatives à la photométrie stellaire seront publiées ultérieurement.

CHAPITRE I.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL.

Les appareils fondamentaux pour l'application de la méthode photographique de l'échelle de teintes sont : un châssis pour l'impression des plages, un étalon lumineux, un photomètre propre à la mesure des noircissements.

Châssis photométrique. — Le châssis doit permettre d'impressionner les bandes successives de l'échelle de teintes et d'intercaler entre elles les plages soumises à l'action de la source étudiée.

Contre la couche sensible se trouve une grille dont les pleins sont égaux aux vides (*fig. 1 b*). Les uns et les autres ont 5^{mm} de large et 16^{cm} de long. Devant cette grille coulisse un volet percé d'une fente parallèle aux fentes de la grille, de même longueur et légèrement plus large (*fig. 1 a*). Le mouvement du volet se fait perpendiculairement aux fentes; il est commandé par une vis dont le pas est de 5^{mm}. Deux tours de la vis déplacent donc le volet de l'intervalle de deux fentes. On peut ainsi impressionner sur la plage une première série de plages de 5^{mm}, séparées par des espaces de même largeur non impressionnés. Un volet auxiliaire permet d'obturer la fente du grand volet et de rendre, au besoin, le châssis étanche à la lumière.

La plaque est maintenue dans l'intérieur du châssis par deux mâchoires parallèles aux fentes de la grille et de même longueur. L'une de ces mâchoires est poussée contre la plaque par des ressorts. L'autre peut occuper deux positions à 5^{mm} l'une de l'autre; un taquet permet, de l'extérieur du châssis, de la fixer dans la position choisie. Par le jeu de cette mâchoire on peut, après avoir impressionné la première série de bandes, déplacer la plaque de 5^{mm} et impressionner la seconde série, celle des bandes intercalées.

Le volet est fixé à la vis par un système d'embrayage. On peut le libérer complètement, l'enlever de sa glissière et découvrir ainsi d'un coup toutes les fentes de la grille. Toutes les bandes correspondantes de la plaque reçoivent alors simultanément la même impression.

Le châssis est construit pour recevoir des plaques 16 × 16, mais on peut

fixer contre une des mâchoires des lames métalliques qui réduisent à tel intervalle qu'on voudra la distance des deux mâchoires. Les mâchoires ayant la largeur entière du châssis peuvent maintenir, par les deux bouts, des bandes de plaques de toutes largeurs jusqu'à 16^{cm} et en maintenir plusieurs juxtaposées simultanément. Cela permet de soumettre plusieurs plaques aux mêmes impressions lumineuses.

Le châssis proprement dit est supporté par deux pieds ayant des embases bien planes et un rebord latéral rectiligne. En posant le châssis sur une table, en face d'une source lumineuse, et en plaçant une règle contre l'embase d'un de ses pieds, on peut le déplacer parallèlement à lui-même et impressionner les bandes successives avec des éclaircissements variables et connus.

Lampe étalon. — Je me suis servi, presque toujours, de lampes à acétylène alimentées par une bouteille d'acétylène dissous. Nous étudierons plus loin la constance de ces étalons. Il suffit d'en donner ici une description qui puisse indiquer leur mode d'emploi dans les études de Photométrie.

J'ai utilisé l'étalon Féry ou l'étalon Fouché.

Dans l'étalon *Féry*, une flamme d'acétylène en jet est produite par un bec à un trou. L'image de la flamme est projetée par un condenseur sur un diaphragme percé d'une fente perpendiculaire à cette image. Contre le diaphragme se trouve une lentille ayant son foyer sur le condenseur. On règle la position du bec et l'écoulement du gaz de manière que la flamme ait une longueur donnée et que sa région la plus lumineuse se projette sur la fente.

M. Monpillard a disposé cet étalon pour la Photographie en enfermant la flamme dans une boîte étanche à la lumière. Il a aussi modifié le diaphragme, qui est alors formé d'une fente parallèle à l'image de la flamme et notablement plus étroite. Cette fente découpe dans la flamme une surface rectangulaire allongée verticalement et dont l'éclat intrinsèque est à peu près constant. Deux vannes mues par une vis graduée à pas opposés limitent la hauteur utilisée sur cette surface lumineuse.

La lampe qui m'a servi était construite comme celle de M. Monpillard, mais avait des dimensions assez différentes.

Le corps de la lampe est un cylindre de 8^{cm} de diamètre et de 15^{cm} de haut. Le condensateur est formé de deux lentilles de 3^{cm} de diamètre, placées à 11^{cm} de la flamme. Il projette sur le diaphragme une image de la flamme ayant 2^{mm} de large et donne, à la sortie de la lampe, un cône lumineux de 23° d'ouverture. La fente verticale du diaphragme Monpillard avait 1^{mm} de large. Comme on pouvait craindre que, pendant la manœuvre de l'obturateur dont la lampe était

munie, la fente ne se déplaçât latéralement sur l'image de la flamme, j'ai abandonné, dans presque toutes les expériences, le dispositif Monpillard et fait tourner la fente de 90° dans son plan. On utilise alors, comme dans le dispositif de M. Féry, une section de la flamme perpendiculaire à sa longueur. Les petits déplacements latéraux du diaphragme n'ont plus d'influence (*fig. 2*).

Perpendiculairement au plan du diaphragme se trouve fixé un tube dans lequel on introduit la lentille convergente placée contre le diaphragme, et au besoin, en plus, une lentille divergente destinée à épanouir le faisceau lumineux. Ce tube sert ainsi de support à l'obturateur.

Dans les recherches de photométrie photographique, il importe de donner aux poses des durées exactement connues. Le moyen le plus simple, si l'on dispose d'une distribution horaire, est d'y brancher l'obturateur. J'ai adapté à l'étalon Féry un obturateur à guillotine à deux volets; chacun d'eux se déclenche par le jeu d'un levier particulier 1 et 2. Ces leviers sont mis en mouvement par le choc de l'armature d'un électro-aimant 3 et 4. La figure 3 indique la connexion entre les électro-aimants et le circuit horaire; un commutateur à deux directions r permet d'intercaler dans le circuit l'un ou l'autre des électros. On peut ainsi, si le circuit horaire envoie un courant toutes les secondes, faire des poses qui sont des multiples exacts de la seconde. On pousse le commutateur sur le circuit de l'électro qui ouvre l'obturateur; puis, une fois l'obturateur ouvert, on compte mentalement le nombre de secondes choisi avant de pousser le commutateur sur le second électro.

Pour ne pas risquer d'introduire de perturbations dans le circuit horaire de l'observatoire, j'ai établi un contact électrique sur un compteur Lepaute battant la demi-seconde et ayant un balancier très lourd. J'ai placé, parallèlement au balancier, un long ressort d'acier fixé par son extrémité supérieure et dont l'autre extrémité est reliée au balancier par un fil. Le ressort, dans son mouvement, vient fermer un contact électrique réglable. La masse du balancier est suffisante pour que ce système n'introduise pas de perturbations sensibles dans la marche du compteur.

L'obligation de compter mentalement la seconde rend les opérations fastidieuses et introduit peut être une cause d'erreur dans les poses longues. Pour celles-ci, j'ai eu l'avantage de pouvoir disposer d'un compteur Bréguet du Passage de Vénus qui donne un contact toutes les dix secondes. Pour les poses dépassant quelques minutes, je pouvais suivre l'heure sur un cadran. J'avais aussi la possibilité de faire donner automatiquement, par la pendule même, le signal d'ouverture et celui de fermeture. A cet effet, le poids du compteur Lepaute,

dont la course est très rapide (2^{cm} par minute), passait dans sa chute entre deux couples de tiges métalliques disposés deux par deux le long d'une planchette (*fig. 4*). Les intervalles des deux couples de tiges étaient différents, comme le montre la figure. Ces couples étaient respectivement intercalés dans les circuits des électros ouvrant et fermant l'obturateur. Le poids du compteur portait des cavaliers de longueurs différentes, réglées de façon que chacun d'eux fermât l'un des circuits. Les cavaliers jouaient le rôle de l'interrupteur à deux directions, indiqué plus haut dans le schéma des connections. Les envois de courants étaient faits par la pendule Bréguet toutes les 10 secondes. La position des couples de tiges n'avait besoin d'être exacte qu'à 1^{mm} près. Au reste, comme ce dispositif n'a servi que pour des poses supérieures à 30^{m} , une erreur de 10 secondes n'aurait produit qu'une erreur de $\frac{1}{180}$ sur la durée de pose.

L'*étalon Fouché* a pour caractéristique d'utiliser la flamme entière d'un bec à un trou, le débit du bec étant maintenu constant. Dans le cours d'une même expérience, si les conditions atmosphériques ne changent pas, le pouvoir éclairant restera constant; aucun dérèglement instrumental n'est possible.

J'ai utilisé successivement deux lampes différentes. L'une est formée d'un cylindre de cuivre de 8^{cm} de diamètre, percé d'une ouverture parallèle à ses génératrices de $2^{\text{cm}} \times 6^{\text{cm}}$. Cette ouverture peut être, à volonté, fermée par une glace; contre elle se trouve fixé un obturateur à guillotine dont la marche est commandée par deux électros. Le cylindre est étanche à la lumière et les prises d'air nécessaires à l'entretien de la flamme se font par trois tubes de 15^{mm} de diamètre. Cette lampe m'a surtout servi pour l'étude de l'*étalon Fouché*. Son obturateur était difficile à armer dans l'obscurité, aussi ai-je été conduit à la remplacer, pour l'usage journalier, par une autre munie d'un obturateur toujours armé (*fig. 5*).

Le corps de la lampe est formé d'une boîte rectangulaire en bois, de 15^{cm} de côté et de 35^{cm} de haut. Une des parois est traversée par une tige métallique à coulisse supportant le bec et par un tube pour l'entrée de l'acétylène. La paroi opposée est percée d'une fenêtre de $6^{\text{cm}} \times 4^{\text{cm}}$. Contre cette fenêtre se meut l'obturateur (*fig. 6*), formé d'un disque d'aluminium de 30^{cm} de diamètre tournant entre pointes; sur son axe s'enroule une ficelle tirée par un poids. Le disque est percé de trois ouvertures limitées par des rayons qui font entre eux des angles de 60° . Elles sont donc séparées par des intervalles égaux et pleins. Ces ouvertures et ces pleins découvrent et masquent alternativement la flamme. Six onglets, répartis sur la circonférence du disque, viennent buter contre l'armature d'un électro-aimant, mais, avant la butée, frottent sur une lame

d'acier qui sert de frein et qui empêche le choc d'être trop violent. La tension de la ficelle étant constante, le mouvement du disque prend la même accélération angulaire dans les ouvertures et les fermetures successives; et la vitesse avec laquelle un des faisceaux lumineux élémentaires issus de la lampe se trouve démasqué est exactement égale à celle avec laquelle il est masqué. La durée de pose de tous les faisceaux lumineux élémentaires issus de la flamme est ainsi la même.

Un seul électro suffit pour l'ouverture et la fermeture de l'obturateur; il est intercalé dans le circuit horaire que nous avons décrit plus haut.

La flamme entière d'un bec d'acétylène, même de faible débit, serait trop intense. On diminuera le flux lumineux par réflexion sur une glace non argentée. Le pouvoir réflecteur de cette glace n'étant pas constant pour tout le spectre, son intervention change légèrement la nature du flux. Si la réflexion se fait sous un angle de 45° , la formule de Fresnel donne respectivement les pouvoirs réflecteurs $R = 0,047$ pour $\lambda 508$ et $R = 0,057$ pour $\lambda 340$. Le faisceau lumineux est donc plus bleu après la réflexion qu'avant.

Je me suis servi d'une glace en verre noir pour éviter la réflexion sur la seconde face. Avec la première lampe, cette glace était placée sur un support indépendant. Avec la seconde, elle était placée sur la lampe même. Devant le disque obturateur se trouve une planchette percée d'une fenêtre de mêmes dimensions que la fenêtre de la lampe. Un cadre muni de deux glissières verticales est fixé devant cette fenêtre, à 45° de la planchette. Dans le cadre, on peut introduire la glace noire qui rejette ainsi latéralement le faisceau lumineux. Le plateau portant la lampe est monté sur un pivot vertical situé dans le plan de la glace et dans le plan axial de la lampe. On peut ainsi, en faisant tourner la lampe de 90° , utiliser dans une direction donnée soit le flux lumineux direct, soit le flux lumineux réfléchi, sans changer la distance du bec à la plaque photographique.

Pour vérifier le débit, il suffit d'intercaler un manomètre différentiel entre deux points de la canalisation de l'acétylène. Un manomètre à air libre, placé immédiatement avant le bec, indique si l'écoulement s'effectue toujours sous la même différence de pression, par conséquent si le bec ne s'encrasse pas. Un robinet placé entre les deux manomètres permet de régler le débit d'après les indications du manomètre différentiel.

J'ai employé deux espèces de manomètres différentiels : un manomètre de Toppler, puis un manomètre dérivé du manomètre de Kretz.

Le manomètre de Toppler est formé par un tube coudé dont les deux

branches font un angle très ouvert; la bissectrice de cet angle est verticale; dans le coude se trouve une colonne de liquide très mobile. Les deux extrémités du tube sont branchées sur la canalisation. La différence de pression entre ces deux points déplace la colonne de liquide d'une quantité d'autant plus grande que l'angle des deux branches est plus ouvert. Le manomètre qui m'a servi a la forme indiquée sur la figure 7. Le courant gazeux passe à travers un capillaire *c* qui augmente la différence de pression entre les points A et B. Dans le premier manomètre que j'ai employé, les deux branches du tube manométrique font un angle de 12° ; leur longueur est de 60^{cm} , celle de la colonne liquide de 30^{cm} . Les branches du tube sont encadrées par deux divisions millimétriques, sur lesquelles on lit les déplacements de la colonne liquide. On peut facilement évaluer le quart de millimètre. Tout le système est placé sur une planchette verticale qui peut pivoter autour d'un axe O. Ce mouvement permet d'amener à l'origine la colonne liquide entre deux divisions convenablement choisies. Les points A et B, réunis par le tube manométrique AEB et par le tube capillaire ACB, le sont encore par un troisième tube large ADB, fermé au moment des mesures par un robinet dont voici l'usage. Lorsqu'on ouvre les robinets de la canalisation, il se produirait, si le tube capillaire existait seul, un coup de bélier sur le liquide du tube manométrique qui serait projeté au dehors. Le robinet D étant ouvert, la présence du tube large empêche ce coup de bélier. Quand l'écoulement a pris son régime normal, la différence de pression entre A et B est très faible, on peut fermer le robinet D.

Pour que ce manomètre ait la plus grande précision possible il faut : ou bien lui donner de très grandes dimensions, ou suivre les déplacements de la bulle avec un microscope commandé par une vis graduée. Cette dernière installation n'était pas possible avec les ressources dont je disposais. Aussi ai-je essayé l'appareil suivant :

Deux tubes cylindriques verticaux de grand diamètre (*fig. 8*) sont réunis par un tube horizontal dix fois plus étroit. Ces tubes sont pleins de xylol; lorsqu'on produit une différence de pression entre les deux surfaces du liquide, il y a un transport de matière d'un gros tube à l'autre, à travers le tube fin. La colonne de liquide qui se déplace a, dans le tube fin, une longueur cent fois plus grande que dans les gros tubes. Une bulle d'air dans le tube fin permet d'y suivre les déplacements du liquide.

Les gros tubes A et B ont 3^{cm} de diamètre et 15^{cm} de haut, le tube de communication 3^{mm} et 60^{cm} de long. Les parties supérieures des gros tubes sont réunies par un tube de verre ABC, muni d'un capillaire C, et par un tube B.

large ADB à robinet. Le long du tube capillaire se trouve une règle graduée en millimètres.

Le manomètre est fixé contre une planchette verticale, elle-même supportée par une planche horizontale reposant sur trois vis calantes; l'une de ces vis est graduée; elle est à une des extrémités de la planchette dans le plan du manomètre; elle fait pivoter tout l'ensemble autour de la droite joignant les pointes des deux autres. On peut ainsi utiliser ce manomètre soit en lisant le déplacement de la bulle, soit en la pointant avec un microscope fixe et en combattant ce déplacement par le jeu de la vis. On peut aussi combiner les deux procédés. Ce manomètre paraissait devoir être très sensible et très commode; malheureusement, dans le cours des expériences de graves défauts sont apparus qui le rendent inutilisable pour notre but : il présente une inertie considérable par rapport à celle du manomètre Toppler; surtout ses positions d'équilibre ne sont pas stables.

Recherchant la plus grande sensibilité, j'ai essayé des liquides, le xylol et le toluène, de faible densité, de faible viscosité et, pour éviter le plus possible l'évaporation, ayant une faible tension de vapeur.

Pendant l'écoulement de l'acétylène, il se produit toujours une évaporation aux deux surfaces A et B. Comme la pression à la surface de sortie en B est moindre qu'à la surface d'entrée en A, la diffusion des vapeurs du liquide manométrique doit être plus grande en B qu'en A; l'évaporation est ainsi plus rapide et la bulle doit se déplacer vers B pendant tout le temps de l'écoulement. C'est en effet ce qu'on observe pendant les premiers jours où le manomètre est en service après qu'on l'a rempli de liquide pur. Il est facile d'ailleurs de tenir compte de ce déplacement de la bulle qui se fait proportionnellement à la durée de l'écoulement. Mais au bout de quelques jours la bulle augmente brusquement de volume jusqu'à tripler, et cela sans que les conditions extérieures de température se soient modifiées, la température du laboratoire étant constante à 1° près. A partir de ce moment, la bulle d'air devient tout à fait instable. Elle se déplace indifféremment en apparence, soit vers A, soit vers B. Même lorsque aucun écoulement ne se produit, que l'appareil est au repos, les déplacements alternatifs de la bulle se continuent lentement; les elongations de part et d'autre du zéro pendant les jours qui suivent l'arrêt atteignent 1^{cm}. On obtient les mêmes effets avec le toluène qu'avec le xylol, et avec des manomètres dont les tubes ont 2^{mm} ou 3^{mm} de diamètre, et les ampoules A et B 20^{mm} ou 30^{mm}. Il est probable que ces phénomènes sont liés à la dissolution de l'acétylène, ou de son impureté l'acétone, dans le liquide manométrique. Cette dissolution ne se produirait que lentement, et ce ne serait que lorsque le liquide voisin de la bulle serait saturé de gaz que celui-ci s'évaporerait dans la bulle même, augmentant ainsi son volume. L'instabilité de la bulle serait alors produite par des actions capillaires complexes. Il est

assez curieux que, lorsque la bulle commence à augmenter de volume, il suffit de la faire courir le long du tube pour la voir en quelques instants presque tripler. Ce sont toujours cependant les mêmes portions de liquide qui se trouvent en contact avec elle dans son mouvement, si l'on en juge par les grains de poussière que l'on retrouve sensiblement aux mêmes places. Il semblerait que ce soit au contact de la gaine liquide le long du tube que la bulle s'enrichisse de gaz. Mes bulles avaient, quand je venais de les former, de 3^{cm} à 5^{cm} de long. Elles restaient parfaitement immobiles tant que les surfaces A et B n'avaient été qu'au contact de l'air. Aucun déplacement dû à la poussée d'Archimède ne se produisait, quoique le tube E fit avec l'horizon un angle de 3°.

J'avais abandonné cet appareil lorsque A. Henry a publié une étude sur ses propriétés. J'ai voulu essayer le liquide qu'il employait, le tétrachlorure de carbone, quoique sa densité soit près du double de celle du xylol et qu'ainsi la sensibilité obtenue soit deux fois plus faible. Le zéro m'a paru beaucoup plus stable; malheureusement les vapeurs de tétrachlorure, mêlées à l'acétylène, produisent par combustion des vapeurs chlorées insupportables dans un laboratoire photographique.

Ayant dû abandonner ce manomètre, je suis revenu au manomètre Topley; mais je lui ai donné des dimensions beaucoup plus grandes pour pouvoir dépasser, par une simple lecture, la précision du centième dans les débits. Mon appareil a 2^m de long, la colonne liquide peut se déplacer de 75^{cm}. Je l'ai muni de deux tubes capillaires C₁ et C₂ et d'un gros tube D qu'on peut introduire indifféremment dans la canalisation. Le gros tube sert à éviter le coup de bélier au moment de l'arrivée du gaz. Les capillaires sont des tubes de 0^{mm},7 de diamètre environ. L'un a 30^{cm} de long, l'autre 20^{cm}. Avec le premier, on peut mesurer les débits ne dépassant pas 6^l à l'heure; avec l'autre, on peut aller jusqu'à 10^l. Avec le premier capillaire, le débit d'un litre provoque un déplacement de la colonne liquide de 105^{mm}. Des curseurs glissent le long du tube, permettant de déterminer à $\frac{1}{4}$ de millimètre près la position de la colonne.

Il est difficile de trouver un tube d'un diamètre constant aussi long que celui qui contient la colonne liquide. Les erreurs qui résultent de l'irrégularité du tube sont évitées si l'on pointe les deux extrémités de la colonne, et si l'on considère la moyenne de ces deux lectures comme en fixant la position.

Nous étudierons plus loin l'étalonnage de ce manomètre; pour le moment il suffit de noter que, par son emploi, on peut vérifier si le débit de l'acétylène est constant et, s'il change, le ramener par le jeu d'un robinet à sa valeur primitive.

Généralement, j'ai fait varier l'éclairement de la plaque, en la plaçant à des

distances diverses de la lampe. Pour cela, la lampe était fixée à l'extrémité d'un très long banc de bois, sur le bord duquel une règle servait d'appui à l'embase du pied du châssis. Le plus souvent, notamment pour l'impression des échelles de teintes, il fallait faire plusieurs poses successives sur la même plaque. Des goupilles, disposées sur le banc avant l'expérience et faciles à retrouver dans l'obscurité, servaient de butées au châssis. Le banc a 12^m de long. Trois fils de cuivre sont tendus d'une extrémité à l'autre et servent de commutateur à deux directions. Le fil supérieur est relié à l'un des électros de l'obturateur; le fil inférieur à l'autre électro et le fil moyen à la pile. L'observateur relie par une pince le fil moyen à l'un ou l'autre fil.

Ce banc d'optique, quoique grossier, permet de fixer à 1^{mm} près la distance de la flamme à la plaque. Cette distance a toujours été supérieure à 80^{cm}. L'erreur sur l'éclairement, introduite par l'erreur sur la distance, n'atteint pas le $\frac{1}{400}$. Elle est très inférieure aux autres erreurs d'expérience.

Photomètre. — L'action d'un flux lumineux sur une plaque photographique se traduit, après les opérations du développement, par une certaine quantité d'argent réduit libéré dans la couche de gélatine. La nature chimique de cette matière importe peu pour la photométrie; il suffit de pouvoir déterminer d'après quelles lois sa masse se trouve reliée à l'éclairement qui lui a donné naissance. On ne peut songer, pour des recherches courantes de photométrie, à peser cette masse, et ce n'est que par des procédés indirects qu'on l'évalue. Le plus souvent, on mesure l'absorption qu'elle produit sur un faisceau lumineux qui la traverse : c'est ce qu'on appelle son *opacité*. L'opacité d'une plaque photographique est le rapport du flux lumineux qui l'a frappée à celle du flux qui la traverse. Le logarithme vulgaire de l'opacité est nommé *noircissement* ou *densité*.

Les recherches de Hurter et Drieffield, d'Eder et de Sheppard et Mees ont montré que la masse d'argent réduit contenue dans une plaque photographique est proportionnelle à son noircissement. C'est la loi même de l'absorption pour les corps transparents. Mais une plaque photographique n'est pas un milieu transparent; les particules d'argent réduit arrêtent et diffusent la lumière dans toutes les directions et, pour que la mesure du noircissement puisse remplacer rigoureusement la détermination de la masse de l'argent réduit, il faut qu'elle soit faite avec de la lumière complètement diffuse. Au reste, cette rigueur n'est nécessaire que pour l'étude des lois qui lient la masse d'argent réduit à l'éclairement, c'est-à-dire pour la sensitométrie; elle ne l'est pas pour la photométrie par la méthode de l'échelle des teintes où l'on com-

pare l'éclairement qui a fourni une quantité d'argent réduit donnée à des éclairéments connus, qui ont fourni deux autres masses d'argent réduit. Il importe peu, pour cette interpolation, que l'on commette des erreurs dans les mesures pourvu que ces erreurs affectent toutes les mesures dans le même rapport.

Les photomètres que l'on utilise pour la mesure de l'opacité doivent permettre l'étude de plages bien délimitées, parfois de très petites dimensions.

Dans les recherches de sensitométrie ou de photométrie photographique, on a employé plusieurs photomètres. Le seul qui ait été utilisé en Astronomie est le *microphotomètre d'Hartmann*. Cet appareil, bien connu, rappelle le microphotomètre Cornu; deux objectifs de microscopes donnent, sur les deux plages d'un écran photométrique, des images très agrandies des deux surfaces lumineuses à comparer; on regarde ces images avec un oculaire; dans l'appareil d'Hartmann, l'une des deux surfaces est la plage photographique étudiée; l'autre, une portion d'un coin photographique. Ce coin est l'organe photométrique; en le déplaçant dans son plan, on amène les deux plages de l'écran à avoir la même apparence. L'écran photométrique est un cube de Lummer et Brodhun. L'image de la plage étudiée se forme sur la zone centrale du cube; les dimensions de la plage étudiée dépendent des dimensions de cette tache centrale et du grossissement du microscope; ce grossissement est assez fort pour qu'on distingue les grains de la plaque photographique et du coin. La mesure n'est donc pas en réalité la comparaison des éclairéments des deux plages de l'écran, mais celle de la distribution des images des grains sur ces plages. Pour que la comparaison soit possible, il faut que cette distribution soit uniforme, donc que les plages photographiques soient unies. C'est là le seul inconvénient du micromètre d'Hartmann, mais il est assez sérieux en Astronomie où les images stellaires extrafocales qu'on étudie sont formées de cercles concentriques de noircissements différents.

Opacimètre intégrateur. — Pour éviter autant que possible cet inconvénient, j'ai été conduit à construire un photomètre que j'ai appelé *opacimètre intégrateur*, pour rappeler sa propriété essentielle qui est d'intégrer les noircissements de tous les points de la plage étudiée, tandis que l'appareil d'Hartmann les sépare. On ne compare plus des images de la plaque et du coin, mais les éclairéments produits sur un écran photométrique par les rayons qui les ont traversés. Ce résultat est obtenu à l'aide d'un système optique analogue au spectrophotomètre Gouy (*fig. 9*).

Principe de l'appareil. — Deux lentilles L_1 et L_2 de même distance focale ont leurs axes à angles droits; elles sont accolées aux deux faces d'un cube de Lummer et Brodhun (*fig. 9*). La plaque photographique se meut dans le plan focal de L_1 ; un coin dans celui de L_2 . Le cube est ainsi traversé par des faisceaux de rayons parallèles venant de la plaque et du coin. Contre sa face de sortie se trouve une troisième lentille L_3 qui fait converger dans un même plan, sur un opercule, les deux faisceaux. L'observateur place l'œil contre l'opercule, regarde les plages de l'écran photométrique illuminées par les flux lumineux à comparer, et leur donne la même illumination en déplaçant le coin. Cette illumination est la somme des illuminations élémentaires produites par les flux lumineux issus de chacun des points des plages étudiées. Quelle que soit l'hétérogénéité de ces plages, l'écran photométrique a ainsi une teinte plate.

La surface étudiée sur la plaque photographique est celle dont l'image se trouve circonscrite par l'opercule. Ses dimensions dépendent de la surface de cet opercule et du grossissement du système optique. Ce grossissement est égal au rapport des longueurs focales de L_1 et de L_3 ; plus il est grand, plus la plage observée est petite. Le diamètre de l'opercule ne peut guère avoir moins de 0^{mm},5 sans que les phénomènes de diffraction ne deviennent gênants; mais en prenant des lentilles de longueurs focales convenables, on peut, en principe, étudier des plages de diamètre beaucoup moindre, aussi petites que celles dont le microphotomètre d'Hartmann permet l'étude.

Réalisation de l'appareil (fig. 10). — Un bloc métallique cubique renferme l'écran photométrique. Contre deux de ses faces sont fixées deux gouttières de 30^{cm} de long dans lesquelles coulisent les supports des lentilles L_1 et L_2 . On peut ainsi placer les lentilles dans les positions voulues, quelles que soient leurs longueurs focales. La gouttière L_1 se termine contre la plaque photographique, la gouttière L_2 contre le coin.

Sur la face du bloc métallique opposée à L_1 se trouve fixée la lentille L_3 et le tube portant l'opercule. Ce tube est fait en deux pièces, ce qui permet d'utiliser pour L_3 des lentilles de 30^{cm} ou de 15^{cm} de longueurs focales.

L'écran photométrique est un écran à contraste; il est formé par deux prismes isoscèles rectangles collés par leurs faces hypoténuses, l'une d'elles ayant été au préalable argentée par endroits. Le cube est disposé de manière que les plages non argentées laissent passer librement dans la lunette la lumière venant de la plaque et que les plages argentées y réfléchissent celle venant du coin. Ces plages argentées réfléchissent par leur face postérieure la lumière venant de la plaque photographique et la renvoient sur la quatrième

face du cube. Cette lumière est reprise par une quatrième lentille L_4 qui forme sur un réticule, dans le champ d'un oculaire, une image de la plaque photographique. On peut ainsi voir et mettre en place la région de la plaque dont l'image se forme sur l'opercule.

L'opercule O est percé dans une lamelle métallique coulissant dans une glissière à l'extrémité du tube L_3 . La même lamelle porte plusieurs opercules de surfaces différentes. Lorsque la plage étudiée sur la plaque photographique est unie, l'observateur peut pointer l'écran en plaçant l'œil directement derrière l'opercule; mais lorsque la plage est très hétérogène, en particulier lorsqu'elle est formée d'une tache noire entourée d'un anneau brillant, les plages de l'écran sont bordées de lisérés, dont l'aspect change quelque peu par des déplacements latéraux de l'œil derrière l'opercule. On fixe la position de l'œil et l'on rend les apparences tout à fait stables en examinant l'écran à l'aide d'un petit viseur dont l'objectif se trouve contre l'opercule. Ce viseur est calculé de telle façon que son anneau oculaire soit notablement plus petit que l'opercule dont il est l'image, et se forme sur la pupille même de l'observateur. Une loupe L , placée sur un support à bascule, permet d'examiner cet anneau oculaire et de parachever le centrage sur l'opercule de la plage qu'on veut étudier.

La plaque photographique est placée dans un cadre mobile dans deux directions rectangulaires, ce qui permet d'amener dans le champ de la lunette L , telle région que l'on veut. Le coin est entraîné par une vis dont la tête est munie d'un tambour gradué.

A l'extrémité des gouttières L_1 et L_2 , presque au contact de la plaque et du coin, se trouvent des diaphragmes qui limitent le plus exactement possible les régions dont les images doivent être circonscrites par l'opercule. Cette précaution est tout à fait nécessaire, comme l'a indiqué M. K. Schwarzschild. Une plaque photographique est en effet un milieu très diffusant, et en l'absence de ces diaphragmes, les régions de la plaque, voisines des régions que l'on veut étudier, produisent sur l'écran une illumination supplémentaire variable d'après leur texture. L'erreur relative correspondante pourrait dépasser parfois $\frac{1}{10}$. Les diaphragmes sont munis des organes de réglage qui permettent de les centrer exactement sur l'axe du système optique passant par l'opercule.

Coin. — Les coins que j'ai employés sont en gélatine colorée par des couleurs d'aniline; je les ai fabriqués par le procédé de M. Goldberg. A l'aide de la glace qui doit servir de support à la gélatine dégradée et d'une glace auxiliaire, sur laquelle on a répandu une couche de vernis au celluloïd et à l'acétate

d'amyle, on forme une sorte de moule cunéiforme, en les séparant à une de leurs extrémités par une cale d'épaisseur convenable. On coule entre les deux glaces la gélatine colorée. Quand elle est figée, on décolle sans peine la glace auxiliaire, la couche de vernis restant à la surface de la gélatine et se séparant de la glace.

Je trouve avantageux d'employer une solution de gélatine très concentrée et de chauffer le moule le plus uniformément possible avant de couler la gélatine. La glace auxiliaire doit déborder latéralement sur l'autre de 4^{mm} ou 5^{mm}. C'est elle qui forme la face inférieure du moule qu'on place sur un support grossièrement horizontal. On coule la gélatine à la partie la plus épaisse du coin, lentement, mais sans arrêt et sans déplacer le point de coulée. La gélatine se répand par capillarité dans toutes les parties du moule. Les deux glaces sont maintenues en place par des pinces; la cale qui les sépare doit déborder latéralement. Il est bon de l'enlever dès que la gélatine a commencé à se figer. Rien n'empêche alors les deux glaces de se rapprocher l'une de l'autre à mesure que la gélatine se contracte. On décolle la glace auxiliaire par une légère pesée sur une lame de couteau glissée à la place de la cale. M. Goldberg recommande, une fois les glaces décollées, de dissoudre le vernis dans de l'acétate d'amyle, pour que la gélatine puisse sécher; j'ai trouvé cette précaution inutile, à condition d'employer un vernis assez dilué. Il est même avantageux de laisser sécher en conservant le vernis, car c'est sur lui que se collent les poussières qui peuvent frapper l'écran; si elles ne sont pas trop grosses, on peut les enlever en dissolvant le vernis quand l'écran est sec. Ce procédé peut servir aussi bien pour les écrans en teintes plates que pour les écrans dégradés.

La gélatine sèche de la manière la plus régulière, sans former aucune strie ⁽¹⁾.

La répartition de la matière colorante dans la gélatine sèche est la même que dans le moule, par suite que dans les coins ordinaires en verre; de l'arête du coin à la base elle augmente proportionnellement la distance. Or les quantités de matières colorantes sont proportionnelles aux logarithmes de leurs pouvoirs absorbants, ou, pour employer le langage des photographes, aux logarithmes des opacités, aux noircissements. Les déplacements du coin sont

(1) Cela est contraire à ce qui se passe trop souvent quand on coule sur une glace de la gélatine en grande épaisseur et à l'air libre. Il se produit alors, en effet, des cloisonnements dans la gélatine au moment où elle se fige, analogues à ceux que M. Bénard a observés dans les couches de cire fondue. Dans le procédé de M. Goldberg, la gélatine étant maintenue entre deux glaces, ses deux faces se refroidissent de la même façon et il n'y a pas entre elles les inégalités de température qui donnent naissance aux cloisonnements. Une fois la gélatine bien figée, les cloisonnements ne se reproduisent plus.

ainsi proportionnels aux noircissements. Mes coins sont des rectangles de 16^{cm} de long sur $3^{\text{cm}}, 50$ de large. La cale avec laquelle le moule est formé a 2^{mm} d'épaisseur ⁽¹⁾.

La lumière qui a traversé le coin devrait en toute rigueur avoir la même teinte que celle qui a traversé la plaque. Les plaques passent parfois pour être de teinte neutre; en réalité, il suffit de comparer une plaque développée à l'hydroquinone, par exemple, à une plaque développée au diamidophénol pour voir qu'il n'en est rien. Il serait donc assez illusoire de chercher à construire un coin de teinte absolument neutre. M. Goldberg colore ses coins à l'aide de noir de fumée, tiré d'une couleur d'aquarelle, le Lampblack. Mais ce produit est difficile à doser et à mélanger à la gélatine. Le noir à l'eau, qui se dissout, est d'un emploi beaucoup plus commode. Il est un peu rouge, aussi est-on obligé d'ajouter un peu de bleu pour obtenir la teinte moyenne d'une plaque photographique ⁽²⁾.

Pour donner plus rigoureusement la même teinte aux deux faisceaux à comparer, on loge contre la lentille 3 un écran en gélatine colorée qui ne laisse passer qu'une petite région du spectre dans le vert.

On peut parfois avoir intérêt, pour la mesure, à augmenter d'une quantité connue le noircissement apparent de la plaque ou du coin, par exemple pour n'avoir pas à se servir des extrémités du coin ou pour éviter une tache. Il suffit de loger, derrière la plaque ou le coin, des écrans absorbants. Le coin Goldberg ayant un gradient uniforme, la présence de ces écrans ne modifie la lecture que d'une constante. De même s'il se produit un changement, d'une série de mesures à l'autre, dans le rapport des flux lumineux qui traversent la plaque et le coin, ce changement ne modifie les pointés que d'une constante; il est facile, si on le désire, de raccorder les deux séries.

On aurait pu, au lieu d'un coin Goldberg, employer un coin photographique, comme dans le microphotomètre d'Hartmann ou dans celui de MM. Fabry et Buisson. Le principal avantage d'un coin photographique, c'est que, s'il est convenablement établi, il peut permettre, comme nous le verrons plus loin, de n'employer dans les réductions des mesures que des interpolations rigoureusement linéaires. Mais lorsqu'il a cette propriété, son gradient n'est pas constant sur toute sa longueur. Un changement dans le rapport des flux

(1) Cette grande épaisseur rend tout à fait négligeable, sauf au voisinage de l'arête, les inégalités de surface des glaces qui forment le moule.

(2) Le coin qui me sert le plus souvent a été formé avec de la gélatine ainsi colorée :

Dans 25^{cm^3} de la solution de gélatine j'ai mis 20 gouttes d'une solution de noir à l'eau Poulenc au $\frac{1}{100}$, 5 gouttes d'une solution de bleu alcali aux $\frac{4}{100}$.

lumineux qui traversent la plaque et le coin ne se corrige plus comme avec le coin Goldberg par l'addition d'une simple constante.

Éclairage. — La condition la plus importante à laquelle doit satisfaire le système éclairant, c'est que les deux flux lumineux qui frappent la plaque et le coin conservent le même rapport pendant toute une série de mesures. Si l'on veut pouvoir mesurer des plages de noircissement un peu grand, il faut de plus que ces flux soient très intenses. L'introduction de l'écran vert qui uniformise les teintes des plages à comparer, fait perdre d'ailleurs beaucoup de lumière.

Considérons le faisceau lumineux qui illumine un point P de la plaque (*fig. 11*).

C'est un cône ayant pour base l'écran photométrique C, et pour sommet le point de la plaque photographique P. Pour que l'écran soit éclairé uniformément, il faut que la section E, par la nappe du cône opposée à l'écran, de la surface lumineuse qui émet le flux, ait un éclat intrinsèque constant. Cette condition élimine l'emploi direct des sources lumineuses par elles-mêmes, qui présentent toutes dans leurs surfaces d'assez grandes inégalités. On est conduit à employer comme source une surface diffusante illuminée elle-même par la source proprement dite S. Cet intermédiaire fait perdre malheureusement beaucoup de lumière.

L'éclat intrinsèque de la surface dépend de sa distance à la source S. Si cette distance est assez grande ou si la source S a elle-même un éclat intrinsèque à peu près uniforme, l'éclat de E doit être uniforme. On voit immédiatement que la quantité de lumière émanée de E et reçue par P est indépendante de leur distance PE. En effet, le flux lumineux envoyé par un point de E à travers la petite surface étudiée P varie en raison inverse du carré de la distance de E à P ; mais, d'autre part, la surface rayonnante E varie en raison directe du carré de cette distance ; les deux effets se compensent. On est donc maître de choisir à volonté la position de E par rapport à P ; il sera avantageux de le rapprocher le plus possible de la source.

L'éclairement de l'écran photométrique dépend de l'aire de la plage étudiée et du grossissement du système optique. Plus la plage est petite, plus est réduite la lumière qui peut la traverser pour éclairer l'écran (1).

(1) Dans le microphotomètre d'Hartmann, l'éclairement de l'écran ne dépend pas des dimensions de la plage. Pour étudier une plage plus petite, on emploie un cube dont la zone centrale est plus petite ; mais l'éclairement de cette zone ne change pas ; il ne dépend que du grossissement du microscope.

Pour une plage de dimensions données, l'éclairement de l'écran croît comme le carré du grossissement linéaire. Pour augmenter le grossissement, on remplace en effet (*fig. 12*) la lentille L_1 , par une lentille L'_1 de longueur focale moindre, et dont le foyer se trouve en P, comme l'était celui de L_1 . La surface éclairante $A'B'$ découpée par le cône lumineux sur l'écran E est ainsi plus grande que la précédente AB dans le rapport $\left(\frac{L_1P}{L'_1P}\right)^2$. Lorsqu'on voudra étudier des plages très petites, il sera donc plus avantageux d'augmenter le grossissement de l'appareil que de diminuer la surface de l'opercule. Si le grossissement augmente trop, la surface AB peut devenir trop grande pour que son éclat intrinsèque soit homogène. Il faut donc la rapprocher de la plaque P et, pour ne pas diminuer son éclat, condenser sur elle la lumière de la source S. On peut aussi projeter sur la plaque même une image de la source lumineuse. C'est la meilleure solution dans le cas de plages très petites (¹), car elle permet de supprimer l'écran diffusant. Il suffit qu'on puisse trouver, sur la source dont on dispose, une surface dont l'image, de même dimension que la plage à étudier, ait un éclat intrinsèque constant. Si la plage dépasse quelques millimètres, cette uniformité est difficile à atteindre et l'on est amené à maintenir la lame diffusante. On n'obtient alors, par ce système, un gain de lumière que si l'angle α est inférieur à l'angle β sous-tendu par la lentille de projection, et ayant pour sommet le point lumineux dont l'image se projette en P (*fig. 13*).

Pour que les flux lumineux qui tombent sur la plaque et sur le coin conservent le même rapport pendant les mesures, le plus simple est qu'ils soient émis par la même source. J'ai adopté le dispositif indiqué sur la figure 8 : la source lumineuse S illumine dans deux directions rectangulaires deux écrans e_1 et e_2 qui, par l'intermédiaire de deux miroirs M_1 et M_2 , servent de fond lumineux à la plaque et au coin. Ce dispositif est suffisant lorsqu'on peut disposer d'une source d'un grand éclat et très constante. Un bec à incandescence alimenté par une bouteille d'acétylène dissous me permet d'étudier, avec l'écran monochromatique vert, des plages ayant 0^{mm},3 de diamètre, et un noircissement *un*; sans écran vert, on peut étudier des plages beaucoup plus sombres (²).

(¹) C'est celle qu'ont adoptée MM. Fabry et Buisson dans leur opacimètre.

(²) J'ai d'abord cherché à utiliser comme source une lampe électrique à incandescence. Mais j'ai dû prendre une lampe dépolie pour éviter la projection sur les écrans des ombres des fils. Les variations qui se produisent sans cesse dans le secteur électrique faisaient varier non seulement, comme je m'y attendais, les intensités des deux faisceaux, mais aussi leurs rapports. Les variations du courant déformaient sans doute les filaments et changeaient leurs distances aux parois

Le cube de Lummer et Brodhun à contraste qui sert d'écran photométrique dans mon opacimètre est, de l'avis unanime, l'écran photométrique le plus précis; il permet d'atteindre dans la comparaison de deux flux la précision de $\frac{1}{150}$. Avec lui les comparaisons sont possibles, même si les deux flux n'ont pas absolument la même teinte et si les diverses plages sont bordées de lisérés. Les différences légères de teintes ne gênent que pour décider de l'égalité des éclairagements et non pour estimer les contrastes (1).

Le plus grand avantage de cet écran est qu'il est d'un emploi beaucoup moins pénible que l'écran ordinaire à égalisation; on peut faire sans fatigue des séances de mesures de plusieurs heures. Naturellement il convient alors de se placer dans l'obscurité. Il est très avantageux de donner, avec une lampe rouge, l'éclairage nécessaire à la lecture des pointés. On ne diminue pas ainsi la sensibilité de l'œil à la lumière verte qui illumine le champ photométrique.

D'après la forme de la courbe caractéristique, la différence de noircissement de deux plages ayant subi l'action de deux éclairagements donnés sera moindre si

très voisines de la lampe qui avaient ainsi des éclats intrinsèques variables. L'expérience suivante confirme cette explication. Dans un lot de lampes de 50 volts, de même origine, j'ai choisi dix couples tels que, sous tous les régimes, leurs éléments conservent la même résistance électrique et j'ai comparé les luminosités des deux lampes d'un couple en les plaçant respectivement tout contre les écrans E_1 et E_2 . Les deux lampes étaient montées en série avec une résistance que je faisais varier pour changer le régime. L'introduction de cette résistance diminuait de 10 volts la différence de potentiel aux bornes de chaque lampe. Sur les dix couples je n'en ai trouvé qu'un pour lequel le rapport des deux éclairagements soit resté constant à $\frac{1}{100}$ près.

Après avoir renoncé aux lampes électriques à incandescence, j'ai essayé un filament Nernst orienté d'abord suivant la bissectrice de l'angle MSM, puis suivant la bissectrice perpendiculaire. Dans le premier cas, j'utilisais les deux faces opposées du filament, dans le second les mêmes points, mais rayonnant dans deux directions rectangulaires. Dans les deux positions le rapport des deux flux changeait très notablement avec le régime du circuit.

Le rayonnement dans une direction donnée d'un bec de gaz à incandescence varie beaucoup lorsque le manchon se déplace sur la flamme. Ce mouvement est inévitable au moment de l'allumage du bec par suite de la petite explosion qui se produit alors. Mais une fois le bec allumé, s'il n'y a pas de courant d'air et si la pression du gaz ne change pas, le rayonnement reste constant. La pression du gaz de houille dans la canalisation urbaine varie au moins autant que la tension du courant électrique. Mais on peut alimenter les becs à incandescence avec de l'acétylène, et la pression du gaz à la sortie d'une bouteille d'acétylène dissous est à peu près constante. Les becs à incandescence à acétylène ont d'ailleurs un éclat intrinsèque beaucoup plus considérable que les becs à gaz de houille ordinaire, ils sont ainsi tout à fait appropriés aux besoins de l'opacimètre.

(1) Aussi faut-il masquer par une bande noire la ligne médiane qui sépare deux plages de même éclairagement et qui devrait disparaître au moment du pointé si les deux flux avaient la même teinte.

les noircissements sont compris dans la région de sous-exposition que s'ils le sont dans celle d'exposition correcte. Les erreurs de pointés auront donc une influence plus grande dans un cas que dans l'autre. Pour permettre de juger de l'importance de ces erreurs je reproduis dans le Tableau I quatre séries de mesures faites sur deux couples de plages dont les éclairéments étaient dans le rapport 1,15. Les noircissements du premier couple appartiennent à la région de sous-exposition, ceux du second à celle d'exposition correcte.

TABLEAU I.

Insolations faibles.		Insolations fortes.	
^t 7,36	^t 8,04	^t 19,26	^t 22,98
45	18	31	91
37	12	30	87
44	8	22	89
40	10	26	93
7,40	8,10	19,27	22,92
Gradation.... 0 ^t ,70		3 ^t ,65	
Rapport des éclairéments.... 1,15			

Les écarts de pointés ne paraissent grands que parce que la graduation de la tête de vis est trop serrée pour la graduation du coin. En réalité, dans le cas défavorable de la sous-exposition, les écarts n'atteignent pas le dixième de la différence des moyennes des deux séries. Comme on fait toujours plusieurs mesures sur la même plage, on peut dire que dans le cas le plus défavorable, l'opacimètre n'introduit pas, en photométrie photographique, d'erreur supérieure au $\frac{1}{100}$. Cette précision peut dépasser le $\frac{1}{300}$ lorsque les noircissements correspondent à une région convenable de la courbe caractéristique.

Dans le Chapitre suivant, nous allons examiner jusqu'à quel point cette précision apparente des mesures d'éclairement est influencée par les propriétés des plaques photographiques.



CHAPITRE II.

ÉTUDE DE LA MÉTHODE DE L'ÉCHELLE DE TEINTE.

Méthode. — A l'aide du châssis photométrique, on impressionne une échelle de teintes à la lumière de la source étalon; on place pour cela le châssis à des distances variables de la source et telles que les bandes de l'échelle reçoivent des éclairissements croissant, suivant le cas, en progression arithmétique ou en progression géométrique. On impressionne ensuite les bandes intercalées, toutes simultanément, en plaçant le châssis à une distance connue de la source à étudier, et telle que l'éclairissement soit intermédiaire entre le plus grand et le plus faible qu'ont reçus les bandes de l'échelle. On mesure sur le cliché développé les noircissements des diverses bandes et l'on trace sur une feuille de papier millimétrique la courbe qui représente les pointés sur l'échelle de teintes en prenant comme abscisses les numéros d'ordre de bandes successives, et pour ordonnées les lectures brutes de l'opacimètre. On trace sur le même quadrillage une seconde courbe relative aux bandes intercalées; les abscisses sont encore les numéros d'ordre des bandes et les ordonnées les lectures. Les abscisses dans les deux séries sont alternées et en progression arithmétique. On peut faire ainsi correspondre à l'échelle des abscisses en numéro d'ordre une échelle en éclairissement ou en logarithme d'éclairissement suivant le genre de progression adopté. On notera l'abscisse du point d'intersection des deux courbes. On admettra que l'éclairissement correspondant est égal à celui qu'avait produit sur la plaque la source étudiée.

La conclusion serait rigoureuse si la sensibilité de la couche et l'action du développateur étaient constantes sur toute l'étendue de la plaque. Le plus souvent il n'en est rien, mais il suffit que leurs variations soient continues et de même sens entre les points où se font les mesures sur deux bandes successives d'une même série. La courbe tirée de l'échelle de teintes peut être, en effet, considérée comme la superposition de deux autres : les courbes des masses d'argent réduit en fonction des éclairissements et en fonction de la position de la plaque. Cette dernière composante est précisément la courbe tracée à l'aide des plages intercalées.

Comme les plages des deux séries dont les points représentatifs sont voisins

du point d'intersection des courbes ont reçu des éclaircissements peu différents, l'influence sur leur noircissement des variations de sensibilité ou de développement sera la même et l'abscisse du point d'intersection sera bien celle qu'on aurait obtenu si ces variations étaient nulles. Nous en montrerons plus loin un exemple.

L'application de cette méthode, quoique fort simple, soulève les questions suivantes :

On dispose dans une large mesure des éclaircissements, des temps de poses, de la nature de l'émulsion, du développeur. Comment les choisir pour rendre la méthode la plus précise possible?

Les impressions des diverses plages ne se font pas simultanément. Quelle erreur peut-il en résulter?

Nous avons supposé que l'échelle de teintes a été impressionnée avec la source étalon à laquelle nous voulons comparer la source étudiée. Dans bien des cas la chose serait difficile ainsi si l'on avait à comparer entre elles deux sources lumineuses passagères. On impressionne alors l'échelle de teintes avec une source auxiliaire, et les bandes intercalées, sur une moitié de leur longueur avec une des sources et sur l'autre moitié avec l'autre. Le plus souvent, alors, la source auxiliaire n'aura pas la même composition spectrale que les sources à comparer. Quelle importance cela aura-t-il pour les résultats?

Nous allons examiner ces divers points. Mes résultats, quoique provenant d'un nombre considérable d'expériences, ne seront cités qu'à titre de documents, car ils dépendent dans une certaine mesure de conditions particulières mal connues : état des plaques, développeur, insolation. C'est là la faiblesse, peut-être irrémédiable, de la photométrie photographique. Il ne peut, actuellement, exister deux plaques photographiques absolument identiques; sous l'action des mêmes agents elles subissent des transformations plus ou moins différentes; je n'ai donc d'autre prétention que d'indiquer quelle erreur on peut commettre dans la comparaison de deux éclaircissements avec les matériaux que j'ai pu employer.

INFLUENCES DES ACTIONS LUMINEUSES ET PHOTOGRAPHIQUES.

Impressionnons avec des éclaircissements constants et des temps de pose variables une série de plages sur une plaque photographique. La courbe, dont les points ont pour abscisses les logarithmes des temps de pose et pour

ordonnées les noircissements, a été appelée par Hurter et Drieffield, la *courbe caractéristique* de la plaque; elle a la forme représentée sur la figure. La région AB (*fig.* 14) est la région de sous-exposition, BC celle d'exposition correcte, CD celle de surexposition. Si, au lieu d'impressionner la plaque avec des éclairissements constants et des temps de pose variables, on avait fait varier les éclairissements et conservé constants les temps de pose, on aurait obtenu, avec les noircissements et les logarithmes des éclairissements comme coordonnées, une courbe de même allure et dont l'usage serait analogue.

Malgré les réserves que Fizeau et Foucault avaient faites dès 1844, beaucoup de photographes ont pensé longtemps que le noircissement n'était fonction que du produit It de l'éclairissement par le temps de pose. Cette loi, dite de *réciprocité*, est inexacte, M. Schwarzschild a remplacé le produit It par le produit It^p , où p doit être considéré comme une fonction de t et de i . Nous appellerons par la suite *insolation* cette grandeur It^p , proportionnelle à la modification que subit la couche sensible. Le noircissement D est une fonction de l'insolation. La courbe caractéristique conserve la même allure en prenant pour variable D et $\log It^p$ ⁽¹⁾.

D'après Hurter et Drieffield la loi du noircissement D en fonction de l'insolation serait dans la région d'exposition correcte

$$D = \gamma(\log It - \log i).$$

La constante i , appelée *inertie*, caractérise la plaque, γ dépend du développement; pour un développateur donné, γ croît avec la durée du développement. Dans la région de sous-exposition la courbe aurait pour équation

$$D = nIt,$$

où n est une constante.

Quelque peu exactes que puissent être ces lois, on peut cependant conclure que, si les noircissements correspondent à la région d'exposition correcte, il sera avantageux d'impressionner l'échelle de teintes par des éclairissements en progression géométrique, tandis que si les noircissements doivent correspondre à la période de sous-exposition, il vaudra mieux avoir recours à une progression

⁽¹⁾ M. Schwarzschild appelle cette grandeur *noircissement latent*. Ce nom peut produire une confusion d'autant plus regrettable que le mot *noircissement* se trouve appliqué à deux grandeurs physiques tout à fait différentes. Le noircissement est une densité, l'insolation est une quantité de lumière. L'expression It est souvent appelée par les auteurs français et allemands *quantité de lumière* (*Lichtmenge* dans le traité d'Eder). Les auteurs anglais l'appellent *exposure*; on a aussi proposé le nom de *lumination*.

arithmétique; la courbe qui représente l'échelle de teintes sera alors sensiblement une ligne droite.

On peut alors, pour les mesures rapides, faire toutes les évaluations à simple vue. Lorsque l'on examine une plaque, la sensation lumineuse qui, d'après la loi de Fechner, est proportionnelle au logarithme de l'excitation, est proportionnelle au logarithme de l'opacité, au noircissement. Si une plage se trouve encadrée entre deux autres et si son noircissement est intermédiaire entre ceux des deux plages, la fraction à ajouter s'évaluera aisément par estime. L'interpolation linéaire faite ainsi sur les noircissements est valable pour les numéros d'ordre des plages et, par suite, pour leurs éclaircissements ou leurs logarithmes d'après la progression adoptée.

On peut, dans les mesures à l'opacimètre, se placer dans des conditions telles que les courbes de réduction soient toujours des lignes droites. Il suffit d'utiliser un coin photographique convenable. Supposons, en effet, que nous établissions ce coin en impressionnant une plaque avec un éclaircissement variable d'un point à l'autre d'après une loi de même forme que celle qui sert pour l'impression des échelles de teintes, que cette plaque soit de même émulsion que les plaques qui servent à la photométrie et le développement identique. Le noircissement du coin, une fois développé, sera alors la même fonction que celui de l'échelle de teintes de la position du point sur la plaque. Lorsque nous mesurerons l'échelle de teintes avec ce coin, les déplacements à donner au coin pour pointer les bandes successives de l'échelle seront évidemment constants. La courbe tracée en prenant pour ordonnées les lectures du coin et pour abscisses les numéros d'ordre des bandes de l'échelle est ainsi une droite. La boîte à pénombre employée à l'Observatoire d'Harvard College pour construire les coins photographiques permet de choisir la loi suivant laquelle on fait leur impression. On peut aussi, pour former un coin avec des éclaircissements en progression géométrique, employer le procédé dont se sont servis MM. Fabry et Buisson pour construire le coin de leur microphotomètre; ils impressionnent, avec de la lumière monochromatique, une plaque derrière une cuve prismatique remplie d'une solution fortement absorbante (¹).

On appelle *gradation* ou *contraste* la différence de deux noircissements, ou, ce qui est équivalent pour nous, des lectures de l'opacimètre qui correspondent à des insolutions données. Les déterminations photométriques seront d'autant plus précises que la gradation sera plus grande, les erreurs commises sur la mesure des noircissements ayant alors une importance moindre.

(¹) Je dois ce renseignement à l'obligeance de M. Buisson.

Cette gradation pour une plaque et un développateur donnés est maxima pour une exposition correcte. Lorsque l'on veut comparer deux sources, on dispose, le plus souvent, du temps de pose et des distances de la plaque aux sources; on pourra donc donner à l'insolation sa valeur optima.

Toutes les plaques ne permettent pas d'obtenir la même gradation; les plaques lentes donnent, en général, une gradation plus grande que les plaques de sensibilité extrême. La nature, la durée, la température du développement influent aussi sur elle. La prolongation du développement l'augmente, une température trop basse la diminue. Le développateur à l'hydroquinone paraît être celui qui donne la plus forte gradation. Pour celui-ci, comme pour les autres, la température la plus convenable paraît être 18°, mais la durée de développement optima est essentiellement variable d'un développateur à l'autre.

TABLEAU II.

Plaques.	Développateur.			
	Diamido.	Diamido acide.	Hydroquinone.	Hydroquinone (durée insuffisante).
Lumière (bleues).....	{ 1,95	2,00	3,85	1,70
	{ 0,70	0,70	1,05	0,85
Lumière Σ.....	{ 1,15	2,80	3,09	0,98
	{ 0,70	0,60	0,97	0,30
As de Trèfle (rouges).....	{ 0,70	2,36	2,44	0,69
	{ 0,75	0,85	1,40	0,71

Le Tableau II indique comme exemple la différence des lectures entre deux plages qui ont reçu l'éclairement 1,15 suivant la nature des plaques et le développement. Le premier nombre de chaque émulsion se rapporte à la région d'exposition correcte, la seconde à la région de sous-exposition.

Des trois plaques étudiées, c'est la plaque Lumière bleue développée à l'hydroquinone qui permet d'obtenir dans la région d'insolation correcte la plus forte gradation. Cette gradation est telle que si les seules causes d'erreur résidaient dans les mesures de noircissements, l'erreur moyenne des pointés à l'opacimètre, supposée égale à 0,05, ne conduirait pas à une erreur de $\frac{1}{1000}$ sur le rapport des éclaircissements. Dans la région de sous-exposition la précision est beaucoup moindre; cependant, avec les plaques As de Trèfle rouges et le développement à l'hydroquinone, l'erreur introduite par les mesures dans cette région de la courbe caractéristique n'atteindrait pas $\frac{3}{1000}$.

Un moyen très efficace et bien connu d'augmenter la gradation entre les plages à mesurer consiste à faire plusieurs reproductions du cliché original et à

mesurer la dernière. On développe à fond chaque reproduction pour que les contrastes soient le plus grand possible, et l'on pose peu pour éviter d'obtenir des noirs trop intenses se prêtant mal aux mesures. Si les reproductions sont faites sur des plaques dites *diapositives*, la gradation peut tripler. Dans le Tableau III j'indique la gradation, sur une plaque Lumière bleue, entre deux plages ayant reçu des éclairagements dans le rapport 1,15 et la gradation que l'on obtient après deux reproductions successives sur plaques Lumière bleues et après deux reproductions successives sur plaque Guillemot pour diapositive.

TABLEAU III.

Gradation sur la plaque originale (Lumière bleue).....	3,85
Gradation après deux reproductions sur Lumière bleues.....	7,07
Gradation après deux reproductions sur Guillemot au lactate.....	11,48

Ce procédé semble permettre à la photométrie photographique d'atteindre une précision presque illimitée. Malheureusement, en même temps que s'accroît la gradation des noircissements, les défauts des plaques multiplient leur influence, et les causes d'erreurs étrangères deviennent prédominantes. Les gradations des clichés originaux signalées au paragraphe précédent sont d'ailleurs plus que suffisantes; il est inutile, pour notre objet, de recourir à cet artifice.

ERREURS A CRAINDRE DANS L'APPLICATION DE LA METHODE.

Sensibilité non uniforme des plaques. — La règle fondamentale de la photométrie photographique voudrait qu'on impressionne avec les deux éclairagements à comparer des plaques identiques. Tout ce que l'on peut faire, c'est de juxtaposer les impressions sur une même plaque. Même contiguës les deux plages insolées ne sont pas identiques, et bien souvent, notamment en photométrie stellaire, il est impossible de les juxtaposer. Quelle erreur peut-on craindre quand on compare des impressions faites aux divers points d'une même plaque?

Les irrégularités dans l'épaisseur de la couche d'émulsion coulées sur les plaques de verre sont la cause principale des irrégularités de noircissement. Les plaques de verre ne sont pas planes; indépendamment des bosses et des creux de peu d'étendue qu'elles présentent, elles ont une courbure générale prononcée. Aussi, lorsqu'on coule sur elle l'émulsion, celle-ci s'accumule-t-elle aux bords ou au centre. Aux endroits où son épaisseur est la plus grande, elle

prend sous l'influence d'un même éclaircissement un noircissement plus fort. Si la plaque de verre ne présente pas de défauts locaux, l'épaisseur de la couche sensible ne varie que lentement; elle est pratiquement constante sur une surface de quelques centimètres de côté. Autant que possible on prendra comme supports des glaces ou du verre choisi; on peut espérer ainsi une régularité plus grande qu'avec du verre ordinaire.

Influence du développement. — Le développement a aussi une grande influence. Il faut éviter les développateurs trop rapides, qui peuvent avoir commencé leur action en certaines régions de la plaque avant que d'autres ne soient convenablement imbibées. Il est bon d'agiter le bain pendant le développement. M. Renwick recommande de balancer la cuvette très lentement avec une période de 15 à 20 secondes environ pour éviter la formation d'ondes stationnaires dans le liquide. M. Jewell introduit dans son développateur quelques centimètres cubes d'alcool qui, d'après lui, rendrait plus régulière la pénétration du bain dans la gélatine. Il est inutile de dire qu'il faut éviter les voiles irréguliers et les colorations de la couche, provoquées le plus souvent par un mauvais fixage ou des lavages défectueux. Une recommandation moins banale, c'est de veiller au séchage; il faut que la plaque soit séchée avec régularité et le plus vite possible. Lorsqu'on laisse sécher la plaque par simple évaporation sur un égouttoir, le coin inférieur met souvent plusieurs heures de plus à sécher que le coin supérieur; son noircissement est différent. Si, après avoir laissé la plaque se sécher lentement, on active le séchage, la région dont le séchage a été accéléré est souvent séparée de l'autre par une bande beaucoup plus noire. Il convient donc, après le lavage, d'essorer la plaque le mieux possible pour qu'elle ne retienne plus que l'eau qui imbibe la gélatine et de terminer le séchage avec un ventilateur.

Le halo par réflexion peut provoquer des variations locales du noircissement. Dans l'application de la méthode de l'échelle de teintes on pourrait penser qu'un antihalo serait inutile. En effet, les bandes que l'on a à comparer sont juxtaposées et ont des noircissements égaux. Sur une assez grande surface la plaque a donc reçu un éclaircissement sensiblement uniforme. La lumière qui forme le halo n'est qu'une fraction très faible de la lumière incidente. Les variations provoquées par des différences d'éclaircissement de la plaque, faibles par elles-mêmes, seront négligeables. Mais cela suppose que les réflexions sur le dos de la plaque ont partout la même intensité. Malheureusement, le dos des plaques est souvent sale et présente de nombreuses taches de gélatine. Ces taches provoquent des irrégularités dans le halo qui, à leur tour, intro-

duisent des irrégularités parfois visibles dans le noircissement de la couche sensible. C'est donc une bonne précaution que de mettre derrière la plaque un antihalo (1).

Quels que soient le support choisi pour l'émulsion et les précautions prises pour le développement, les variations du noircissement d'un point à l'autre de la plaque dues à des causes purement photographiques introduisent des erreurs bien supérieures à celles provenant de la mesure du noircissement. Le Tableau IV donne une idée des erreurs à craindre.

Il se rapporte à une plaque Lumière Σ et à une plaque Grieshaber étiquette rouge, toutes deux coulées sur glace et de 16^{cm} de côté. Les mesures ont été faites sur des bandes ayant reçu le même éclaircissement en des points dont les distances au bord, en centimètres, sont indiquées sur la première ligne. Les nombres des deuxième et troisième lignes sont, à une constante près, les pointés à l'opacimètre. Tous ces nombres auraient dû être égaux.

TABLEAU IV.

Plaques.	Distances au bord (en centimètres).							
	1.	3.	5.	7.	9.	11.	13.	15.
Grieshaber ..	1,04	0,70	0,55	0,48	0,22	0,15	0,22	0,00
Lumière.....	2,26	0,00	0,50	0,79	0,88	0,89	0,74	0,04

La gradation de ces plaques est telle que, en multipliant leurs éclaircissements par 1, 2 on aurait augmenté le noircissement de la plaque Σ de 2, 4 et celui de la plaque Grieshaber de 3, 50. Les différences de noircissement données par le Tableau IV, qui ne proviennent que de la plaque, feraient croire à des éclaircissements présentant entre eux les rapports suivants :

TABLEAU V.

Grieshaber ..	1,06	1,04	1,03	1,03	1,01	1,01	1,01	1,00
Lumière.....	1,18	1,00	1,04	1,07	1,07	1,07	1,06	1,00

(1) C'est d'ailleurs une opération très simple et il est inutile de combiner des mixtures compliquées et sales. Il suffit, comme le faisaient les frères Henry, de découper à la dimension de la plaque dont on se sert une feuille de papier rouge ou noir, du papier d'emballage des plaques, et de le coller avec de la glycérine au dos des plaques. Quoique ce procédé soit, théoriquement, moins parfait que celui de Cornu, il empêche cependant la production d'un halo apparent avec une pose de 30 minutes sur Jupiter, à l'instrument de la Carte du Ciel, alors que, sans la feuille, le halo apparaît au bout de quelques secondes. Au moment du développement, il suffit de décoller la feuille; le peu de glycérine qui reste se dissout dans le bain et n'a pas d'action sur lui. Il est d'ailleurs facile de l'enlever avec un tampon d'ouate humide sans risquer de salir la couche sensible.

L'erreur ainsi commise atteindrait donc 6 pour 100 avec la plaque Grieshaber et 18 pour 100 avec la plaque Lumière. Ces plaques coulées sur glace sont d'ailleurs notablement meilleures que la plupart des plaques sur verre qui m'ont servi.

Certains expérimentateurs essaient de corriger ces erreurs en retranchant des noircissements des plages étudiées le noircissement du fond du cliché dans les régions voisines. C'est ainsi, en particulier, que M. Parkurst a opéré pour l'établissement de son catalogue de grandeurs stellaires. Une telle correction, bien loin de correspondre à l'erreur commise, peut même être de sens inverse. Voici par exemple (Tableau VI) les noircissements du fond de la plaque Σ considérée plus haut, au voisinage des plages étudiées. La première ligne se rapporte aux noircissements des plages, la seconde à ceux du fond en prenant encore pour origine des lectures la lecture sur la plage 3.

TABLEAU VI.

	1.	3.	5.	7.	9.	11.	13.	15.
Plages	-2,26	0,00	0,50	0,79	0,88	0,89	0,74	0,04
Fond	-0,52	0,00	0,07	0,14	0,12	0,05	0,14	0,57

Si la correction était efficace on devrait, en retranchant les nombres de la seconde ligne de ceux de la première, trouver des résultats voisins de zéro; il n'en est manifestement rien.

Je pourrais relever dans mon cahier de mesures un très grand nombre d'exemples de ce genre.

Les variations du noircissement du fond, qui n'est produit que par l'effet chimique du développateur sur l'haloïde d'argent, n'ont donc pas les mêmes valeurs que les variations du noircissement des plages qui ont reçu une impression lumineuse. La couche sensible n'a pas la même aptitude à former une image latente qu'à réagir sous l'action du développateur.

Ces variations de sensibilité d'un point à l'autre de la plaque n'ont une grande influence en photométrie que si l'on a à comparer des noircissements de points éloignés. Dans la méthode de MM. Camichel et Cotton, où les plages sont juxtaposées, leur importance est beaucoup moindre. Le Tableau VII reproduit les résultats de trois séries de mesures faites pour déterminer la valeur de l'éclairement reçu par une plaque Lumière bleue sur les bandes intercalées par rapport aux éclaircissements reçus par les bandes de l'échelle de teintes. Les mesures ont été faites, dans chaque série, aux points de rencontre des axes de chaque bande et d'une même perpendiculaire à leur direction, par consé-

quent en des points situés à 5^{mm} l'un de l'autre. Les perpendiculaires correspondant aux trois séries sont espacées de 5^{mm}. Dans le Tableau, la première ligne comprend les numéros d'ordre des bandes de l'échelle de teinte, les suivantes les résultats des mesures.

TABLEAU VII.

	6.	Bande intercalée.	7.	Bande intercalée.	8.
Première série.....	9,22	7,57	7,51	7,36	6,29
Deuxième série.....	8,24	7,34	7,31	7,21	6,06
Troisième série.....	9,24	8,29	8,43	8,50*	7,31

Le rapport des éclairagements qui ont formé l'échelle de teintes est de 1,2. Si la plaque était homogène les nombres d'une même colonne devraient être égaux, ainsi que ceux qui se rapportent aux bandes intercalées. On voit quels grands défauts présentait cette plaque. Cependant on trouve des nombres sensiblement identiques si l'on détermine, d'après chacune des séries, la valeur de l'éclairément reçu par les bandes intercalées. Dans la figure 15 se trouvent reproduits les graphiques qui permettent la réduction des mesures. Les points représentant chaque plage mesurée ont pour abscisses les numéros d'ordre des bandes et pour ordonnées les pointés à l'opacimètre. Le noircissement des bandes intercalées (courbes B) fractionne le noircissement des bandes 7 et 8 des échelles de teinte (courbes A) dans les mêmes proportions que les ordonnées des points d'intersection des courbes A et B fractionnent les ordonnées des points 7 et 8. La bande fictive de l'échelle de teintes qui aurait reçu le même éclairément que les bandes intercalées aurait pour numéro d'ordre, dans les trois séries,

7,04

7,04

7,03

L'accroissement du logarithme de l'éclairément de la bande 7 à la bande 8 est dans ce cliché 0,080. Si E est l'éclairément reçu par la bande 7, l'éclairément calculé pour cette bande fictive aurait les trois valeurs

1,005 E

1,005 E

1,007 E

Les trois séries concordent à $\frac{2}{1000}$ près.

Si les bandes n'avaient pas été imbriquées les unes dans les autres, si l'on avait voulu, par exemple, mesurer l'éclairément reçu par la plage de la troisième série marquée d'une astérisque (Tableau VII) à l'aide de l'échelle de

teinte de la deuxième série, pourtant très voisine, on aurait trouvé que cet éclairement correspondait à celui de la bande fictive de l'échelle de teintes 6,16; il aurait pour valeur 0,857 E et l'erreur atteindrait les $\frac{15}{100}$.

Cet exemple parmi bien d'autres montre que la méthode de MM. Camichel et Cotton permet de ne pas tenir compte des variations continues de la sensibilité de la plaque. Sans doute, elle ne permet pas d'éliminer l'influence des taches moins larges qu'une bande, des piqûres, des agglomérations locales de grains d'argent. Aussi y-a-t-il intérêt à mesurer des plages les plus grandes possibles. Le châssis photométrique permet d'imprimer des bandes de 5^{mm} de large; pour étudier avec mon opacimètre des plages de ce diamètre, il suffit de donner à la lentille L₃ une longueur focale moitié de celle de L₁; l'image de la plage sera notablement plus petite que la pupille.

Les plaques sur glace ne présentent jamais, sauf tout au bord, des variations de sensibilité aussi rapides que celles auxquelles se rapporte le Tableau VII. Ce n'est cependant qu'avec la plus grande prudence qu'on doit déduire du noircissement d'une plage l'éclairement qu'elle a reçu lorsqu'elle n'est pas encadrée par les plages mêmes de l'échelle de teintes qui doivent servir à la réduction. La correction tirée du noircissement du fond du cliché est illusoire.

Dans la photométrie stellaire il n'est généralement pas possible de juxtaposer les images d'étoiles à l'échelle de teintes aussi exactement que dans la photométrie de laboratoire; il faut donc choisir des plaques très homogènes, de préférence des plaques sur glace: On développera d'une manière identique la plaque portant l'échelle de teintes et le cliché stellaire, et l'on fera des mesures sur l'échelle en des points assez différents pour pouvoir considérer la gradation de l'échelle comme bien déterminée. Un dispositif analogue à mon châssis photométrique permettra d'impressionner l'échelle sur une plaque assez grande pour donner une bonne valeur moyenne de la gradation. On raccordera le cliché stellaire au cliché portant l'échelle en impressionnant sur lui une série de petites plages de même diamètre que les images stellaires et uniformément distribuées à sa surface, par exemple, avec des plaques sur glace, au sommet d'un quadrillage de 2^{cm} de côté. Ces plages formeraient deux groupes imbriqués l'un dans l'autre, les plages de chaque groupe ayant reçu le même éclairement de la source qui a fourni l'échelle de teintes, et les deux groupes, des éclaircissements un peu différents. La comparaison des deux séries de plages indiquerait si la gradation du cliché stellaire est la même que celle de l'échelle et, dans l'affirmative, quelle est la constante à ajouter aux noircissements des images stellaires pour les faire correspondre à ceux de l'échelle. Les noircissements des plages de comparaison devraient être peu différents de ceux des

étoiles qu'on étudie. Nous donnerons ailleurs un exemple de l'application de cette méthode.

Instabilité de l'image latente. — Les impressions faites sur une même plaque par les deux éclairagements étudiés ne sont pas, en général, simultanées. Si l'image latente se modifie avec le temps, les modifications ne seront pas les mêmes pour les diverses plages. M. de la Baume Pluvinel s'est aperçu depuis longtemps que l'image latente était instable et a eu l'amabilité d'attirer mon attention sur ce fait. Plus récemment, M. Ch. Brush a annoncé que l'image latente augmente d'intensité après la pose, pendant quelques minutes, puis qu'elle diminue.

J'ai cherché à me rendre compte de l'importance et de l'allure de ce phénomène par les expériences suivantes :

Découpons une plaque, où une échelle de teintes a été impressionnée depuis 4 ou 5 jours, en bandes perpendiculaires à l'échelle. Sur ces morceaux, insolons simultanément les bandes intercalées avec le même éclairagement; développons l'un des morceaux 10 secondes après la pose, les suivants plus tard à des intervalles de quelques minutes. Si tous les morceaux avaient été développés ensemble, les courbes représentant pour chacun d'eux les noircissements des bandes intercalées auraient coupé aux mêmes points celles représentant les échelles de teintes. S'il y a des modifications rapides de l'image latente après la pose, les points d'intersection des diverses courbes doivent différer. La valeur assignée à l'éclairagement des bandes intercalées d'après l'échelle de teintes doit différer d'un morceau à l'autre.

J'ai fait cette expérience avec les plaques Lumière bleue, As de Trèfle lilas et rouge, Jougle bleue et intensive. Les résultats ont été très divers, mais pour toutes ces plaques l'image latente subit, après la pose, des variations rapides et importantes.

Avec les plaques Lumière bleues qui seraient très précieuses pour leur bonne gradation et leur homogénéité, l'image latente s'accroît après la pose. L'image latente peut tendre asymptotiquement vers un état final bien défini, ou passer par un maximum d'intensité pour diminuer ensuite. Si l'on savait à quelle époque cette intensité maximum est atteinte, il suffirait de retarder le développement jusque-là pour éliminer l'influence de l'instabilité de l'image; mais il ne semble pas que cette époque soit très bien définie. Le plus souvent, 24 heures après la pose, la variation paraît très lente, mais j'ai eu des exemples d'une variation de quelques centièmes entre le deuxième et le troisième jour de l'existence de l'image latente. Quelques nombres (Tableau VIII) permettent

de juger de l'importance du phénomène. Je suppose qu'on ait cherché à déduire de l'échelle de teintes la valeur de l'éclairement reçu par les bandes intercalées; je prends comme unité la valeur de l'éclairement trouvé à l'aide du morceau développé aussitôt après la pose (10 secondes). On trouve pour les autres morceaux les éclairements indiqués dans les colonnes suivantes :

TABLEAU VIII.

Durée de la pose.	Époque du développement. — Développement après :			
	10 ^s .	5 ^m .	15 ^m .	48 ^h .
10 secondes.....	1	1,13	1,12	1,17
15 minutes.....	1	1,04	1,02	1,11
10 secondes.....	1	1,05		1,19
10 secondes.....	1	1,05		1,21

} Noircissement moyen
 } Noircissement intense
 } Noircissement faible

Je rappelle que l'erreur introduite par les mesures à l'opacimètre ne dépasse guère $\frac{1}{300}$. D'autre part, les nombres d'une même horizontale du Tableau correspondent à des impressions simultanées, à distance invariable de la source; elles ont donc reçu le même éclairement. On voit l'importance de la cause d'erreur signalée par M. de la Baume Pluvinel.

Dans une autre série d'expériences, j'ai cherché ce qui se produit lorsqu'on donne à une plaque trois insulations égales séparées par des intervalles de 10 minutes et qu'on développe la plaque 1, 2 ou 3 jours après la pose. Si dans l'intervalle l'image latente avait atteint un état stable, les trois impressions reçues par chaque plaque se seraient rattrapées et toutes les trois auraient dû fournir la même valeur de l'éclairement. C'est ce qui arrive le plus souvent à $\frac{1}{100}$ ou $\frac{2}{100}$ près tout au moins, 24 heures après la pose.

Le Tableau IX en contient un exemple.

TABLEAU IX.

Époque du développement.	Époque des poses.		
	0 ^h 0 ^m .	0 ^h 10 ^m .	0 ^h 20 ^m .
24 heures.....	1,00	1,01	1,01
48 heures.....	1,00	1,03	1,02
72 heures.....	1,00	1,00	1,03

Malheureusement, les discordances sont parfois si grandes que toute application de la méthode de l'échelle de teintes paraît impossible, tout au moins, avec

de telles plaques tant que les lois de ce phénomène n'auront pas été élucidées. En voici un exemple remarquable (Tableau X) :

TABLEAU X.

Époque du développement.	Époque des poses.		
	0 ^h 0 ^m .	0 ^h 10 ^m .	0 ^h 20 ^m .
24 heures.....	1,00	0,99	1,05
48 heures.. ..	1,00	0,98	0,94
72 heures.....	1,00	0,89	0,98

On pourrait être porté à attribuer les différences constatées à des variations de l'étalon lumineux de l'une à l'autre pose. Mais les plaques étaient placées à la fois dans le châssis; en admettant une variation de l'étalon bien invraisemblable dans le cours d'une expérience d'un quart d'heure, il en serait résulté des différences entre les nombres correspondants d'une colonne à l'autre. Mais à partir du moment où l'image latente aurait atteint sa valeur maximum, ces différences se seraient conservées d'une ligne à l'autre. On voit que l'image latente n'a pris une valeur stable, ni au bout de 24 heures, ni au bout de 48 heures; je crois pouvoir ajouter, ni au bout de 72 heures.

A la vérité, les nombres relatifs à ces trois plaques présentent des discordances telles qu'on se demande si les images latentes auraient bien subi sur chacune d'elles les mêmes transformations. Mais si ce fait peut se produire pour des plaques d'une même émulsion, pourquoi ne se produirait-il pas pour les différents points d'une même plaque? On serait donc amené à mettre en doute la légitimité de la méthode de l'échelle de teintes, même de toute méthode de photométrie photographique. En fait, on a déjà accompli en photométrie stellaire des recherches magistrales dans lesquelles la précision atteint au moins le cinquantième, ce qui suffit à établir que toutes les plaques n'ont pas l'instabilité des plaques Lumière bleues, que j'ai étudiées. Mais même pour ces plaques, on peut admettre que tous les points qui ont reçu simultanément la même insolation subissent avec le temps les mêmes transformations. Je me suis, en effet, astreint, dans le cours de ces recherches, à réduire plus de cinquante clichés photométriques en mesurant les noircissements de leurs bandes sur deux perpendiculaires aux bandes espacées le plus possible (en général à 2^{cm}). Toujours les deux séries de mesures m'ont conduit à un demi-centième près au même résultat. Les distances des différentes poses sur les plaques qui m'ont fourni les Tableaux VIII, IX et X ne sont pas plus grandes. J'ai cité plus haut (Tableau VII) un exemple dans lequel, malgré de très grands défauts d'homogénéité de la plaque dans des

régions voisines, les valeurs de l'éclairement déduites de ces régions sont pratiquement identiques. Voici un autre exemple (Tableau XI) dans lequel les perpendiculaires aux bandes le long desquelles j'ai fait les mesures sont espacées de 2^{cm}, 5. Ce Tableau est disposé comme le Tableau VII, la plaque a été développée deux heures après la pose.

TABLEAU XI.

Abcisses des séries de mesures.	Numéros des bandes de l'échelle.				
	6.	Bande intercalée.	7.	Bande intercalée.	8.
mm	^t	^t	^t	^t	^t
0.	20,68	15,81	17,36	15,49	13,83
25.	19,29	15,04	16,30	14,92	13,28
50.	19,39	15,08	16,44	14,99	13,48
75.	19,69	15,24	16,87	15,40	13,71

Les nombres de ce Tableau sont les lectures brutes faites à l'opacimètre (moyenne de 5 pointés). Je rappelle que si la plaque avait été parfaitement homogène, les nombres d'une même colonne auraient dû être égaux. Le rapport des éclairéments entre les différentes bandes de l'échelle de teinte est sensiblement 1,2. Les variations de sensibilité de la plaque correspondent donc à des variations d'éclairement atteignant un dixième. Malgré cela, dans les diverses plages, les images latentes se sont modifiées d'une manière tellement identique que les écarts des valeurs de l'éclairement reçu par les bandes intercalées, calculées d'après les différentes séries, ne dépassent pas un demi-centième. La bande fictive de l'échelle de teintes qui aurait reçu le même éclairement que les bandes intercalées a pour numéro d'ordre dans les différentes séries

7,500 7,455 7,480 7,470

Les éclairéments correspondants

0,995 0,994 1,000 1,000

Les écarts peuvent être attribués aux erreurs de mesures à l'opacimètre. L'emploi des plaques Lumière bleues pour la photométrie paraît donc bien légitime, mais à condition de produire simultanément toutes les insulations qu'on veut comparer. Même avec cette restriction, on peut imaginer des appareils permettant l'emploi de l'échelle de teintes. Ce serait toutefois introduire une complication instrumentale très grande, et supprimer un des plus grands avantages

de la méthode photographique, celui de rendre possible la comparaison de phénomènes non simultanés.

Dans l'espoir de rendre à la méthode toutes ses qualités, j'ai cherché si, par chance, on trouverait des plaques dans lesquelles l'image latente serait plus stable et j'ai essayé les plaques As de Trèfle, étiquette rouge et lilas, qualifiées au gélatino-bromure comme les plaques Lumière, les plaques Jouglà, bande bleue, qualifiées à l'iodobromure, et les plaques Jouglà intensives qualifiées à l'ésoïne émétique, morphine? Ces nouvelles expériences n'ont pas été aussi étendues que les précédentes, et il se peut que leurs résultats aient un caractère encore plus accidentel. Il m'a paru cependant que, pour les plaques As de Trèfle comme pour les plaques Lumière, l'image latente s'accroît après la pose. L'effet est sensiblement du même ordre avec les plaques lilas qu'avec les plaques Lumière bleues; il est bien plus faible avec les plaques As de Trèfle rouges et ne paraît pas introduire d'erreur supérieure à un ou deux centièmes si l'on développe quelques heures après la pose. Si cette conclusion était confirmée, ces plaques seraient parfaitement adaptées à la photométrie photographique stellaire; elles sont trop rapides pour la photométrie de laboratoire.

Les plaques Jouglà présentent une instabilité inverse; l'image latente ne cesse de diminuer d'intensité. La diminution est le plus rapide tout de suite après la pose; ensuite, au moins pendant 24 heures, elle paraît sensiblement proportionnelle au temps; la différence d'éclairement correspondant à cet affaiblissement de l'image latente est en 24 heures environ de $\frac{1}{10}$, avec les plaques bande bleue, et de $\frac{2}{10}$ avec les plaques intensives. De plus, entre deux morceaux de plaque développés, l'un 10 secondes, l'autre 5 minutes après la pose, la variation est, avec les plaques Jouglà, le $\frac{1}{3}$ de la variation totale, tandis qu'avec les intensives, elle n'en est que le $\frac{1}{10}$. Avec les plaques bande bleue, le taux de la variation paraît donc, une fois ces 5 minutes écoulées, presque trois fois plus faible que pour les plaques intensives. Je répète que ces résultats ne reposent pas sur des expériences assez nombreuses pour affirmer leur généralité. Ils suffisent, cependant, à justifier l'emploi de la plaque Jouglà bande bleue pour l'application de la méthode de l'échelle des teintes. Les modifications que subit l'image latente sur ces plaques étant relativement faibles, l'incertitude sur les lois auxquelles elles obéissent, a moins d'importance qu'avec les intensives. L'important c'est que ces modifications se fassent toujours dans le même sens et avec une vitesse à peu près constante. Dans la comparaison de deux sources lumineuses, il suffira alors de croiser les expériences pour que l'influence de l'instabilité de l'image latente s'élimine dans les moyennes.

L'instabilité de l'image latente est assurément le point faible de la photomé-

trie photographique. Si les autres causes d'erreurs existaient seules, on atteindrait sans doute une précision de quelques millièmes; tant que l'on n'aura pas trouvé de plaques telles que l'image latente soit fixe, il ne paraît pas que l'on puisse compter sur une précision supérieure au $\frac{1}{100}$ lorsque toutes les poses ne sont pas simultanées. Les bizarreries du Tableau X montrent qu'il faudra toujours craindre des erreurs beaucoup plus grandes, et qu'il sera prudent de répéter les expériences.

L'expérience journalière établit que l'on peut développer un cliché, portrait ou paysage, bien longtemps après la pose sans que l'image ait perdu ses qualités. Ce fait peut sembler en contradiction avec les variations de l'image latente dont nous venons de nous occuper, et qui dépendent sans doute de l'insolation. Mais l'ordre de grandeur des différences de noircissements, entre les différents points d'un portrait ou d'un paysage, est tout autre que celui qui résulte de l'instabilité de l'image latente; ces variations ne peuvent rien enlever à la valeur d'un cliché d'amateur; elles doivent y passer inaperçues.

Dans les clichés stellaires portant plusieurs poses successives de même durée, on a plusieurs fois signalé une intensité plus faible des images de la seconde pose. Ce fait a été mis sur le compte d'une diminution de sensibilité de la plaque pendant la pose, résultant d'une variation de sa température ou surtout d'une augmentation de son état hygrométrique. Ces deux causes, particulièrement la seconde, peuvent en effet expliquer le phénomène. Cependant, on peut juger qu'une part en revient à l'instabilité de l'image latente: que les plaques dont on se sert présentent la même propriété à un degré un peu plus fort que les plaques Lumière bleues et l'on pourra avoir entre les diverses poses des différences atteignant le $\frac{1}{10}$ de grandeur.

INFLUENCE DE LA COULEUR DE LA SOURCE LUMINEUSE.

Il est banal de rappeler que la sensibilité d'une plaque photographique n'est pas la même pour les diverses couleurs du spectre et qu'on ne peut conclure l'égalité des intensités de deux radiations différentes de l'égalité des noircissements qu'elles produisent. La photométrie photographique comme la photométrie visuelle n'a donc de sens en toute rigueur que lorsqu'elle se limite à la comparaison de deux sources de même longueur d'onde.

Cependant, avec certaines précautions, la photographie peut être appliquée à la comparaison des intensités des diverses radiations. L'action d'une radiation quelconque se traduit toujours par le même phénomène, la transfor-

mation de l'haloïde d'argent dans l'image latente en un corps susceptible de produire sous l'action du révélateur une certaine masse d'argent réduit. Cette masse peut ainsi servir à comparer les énergies de deux flux de longueurs d'ondes différentes. Il suffit de connaître pour chacune d'elles et pour la plaque photographique utilisée, la loi reliant la masse d'argent à l'énergie du flux, loi qu'on peut déterminer par l'observation d'un corps noir à une température connue. Ce mode de comparaison des énergies de deux rayonnements est assurément plus compliqué qu'une méthode thermométrique; mais il est possible, même pour des radiations de longueurs d'ondes très différentes. Dans les méthodes visuelles, au contraire, les diverses radiations n'ont pas de commune mesure; on ne peut juger de l'égalité de deux flux que par l'égalité des éclairissements qu'ils produisent et, dès que les teintes des deux éclairissements sont légèrement différentes, il est impossible de les comparer (¹).

La loi qui relie la masse d'argent réduit à l'énergie du flux, varie lentement pour les plaques ordinaires avec la longueur d'onde, sauf pour les radiations limites du côté des grandes longueurs d'ondes. La courbe de sensibilité chromatique passe par un maximum très peu accentué aux environs de $\lambda 430^{\mu\mu}$. De part et d'autre de ce maximum, elle possède un palier qui s'étend à peu près de $\lambda 390$ à $\lambda 470$. Les diverses radiations appartenant à ce palier ont la même loi de noircissement; leurs énergies peuvent être comparées par l'intermédiaire de la courbe caractéristique tracée à l'aide de l'une quelconque de ces radiations.

La comparaison de sources polychromes émettant des spectres continus est évidemment légitime lorsqu'on se sert de plaques pour lesquelles ce palier existe et que l'on se borne à la comparaison de l'ensemble des radiations qu'il comprend. (Il suffit, pour les isoler, de placer devant la plaque un écran convenable.) La distribution de l'énergie peut être différente dans les deux spectres, peu importe; les impressions faites sur les plaques par chaque source sont la somme des impressions produites par les radiations élémentaires, et puisque la loi de noircissement est, par hypothèse, la même pour chacune d'elles, elle doit

(¹) Le photomètre à papillotement et le photomètre à contrastes permettent cependant cette comparaison, mais pour des différences de teintes très faibles. On ne juge pas d'ailleurs, dans ce cas, de l'égalité de deux éclairissements, mais on repère une apparence lumineuse qui dépend d'une manière inconnue du rapport des énergies de deux flux. Ces méthodes n'ont quelque rigueur que dans le cas où l'on aurait à comparer deux flux a_1 et a_2 de même longueur d'onde par l'intermédiaire d'un troisième b de longueur d'onde différente. Si l'on a repéré la même apparence dans la comparaison de a_1 et de b que dans celle de a_2 et de b , on peut en déduire l'égalité de a_1 et de a_2 , mais rien pour leur rapport avec b .

être aussi la même pour leur somme; la plaque permet donc la comparaison des énergies totales des deux spectres.

Il n'existe pas, à ma connaissance, de détermination de la courbe de sensibilité chromatique d'une plaque que l'on puisse qualifier d'absolue, c'est-à-dire qui soit indépendante de la distribution de l'énergie dans le spectre de la source employée. On ne peut indiquer les radiations qui limitent le palier de la courbe de sensibilité chromatique. Les lois des noircissements des radiations qui tombent en dehors de ce palier, au moins du côté bleu vert, sont tout différentes de celles des radiations du palier. Si l'on voulait comparer les intensités globales de deux sources polychromes par la méthode de l'échelle de teintes en se servant de l'une d'elles pour établir l'échelle, on commettrait une erreur sensible, dont les expériences suivantes indiquent l'ordre de grandeur.

J'ai d'abord cherché à comparer le flux lumineux émis directement par un bec à acétylène au même flux filtré par une solution ammoniacale de sulfate de cuivre. La courbe chromatique d'absorption de cette solution comprend deux bandes, l'une assez étroite ayant son maximum vers $\lambda 360^{\text{m}\mu}$ et s'étendant de $\lambda 330$ à $\lambda 380$ environ, l'autre plus large dont le maximum est vers $\lambda 600$ et dont le bord violet s'élève graduellement jusqu'à ce maximum à partir de $\lambda 480$ sensiblement. Les hauteurs des deux maxima sont sensiblement les mêmes.

Cette solution supprime donc, dans le spectre, d'un côté du maximum de sensibilité chromatique la région bleu vert pour laquelle la loi du noircissement diffère le plus de celle du maximum, et de l'autre côté, un groupe de radiations qui font peut-être encore partie du palier. L'expérience montre que l'introduction de cet écran modifie quelque peu les propriétés actiniques du flux. Avec la flamme nue, j'avais imprimé une échelle de teintes et j'avais cherché à l'aide de cette échelle à déterminer le rapport de deux éclairagements produits par la flamme filtrée. Le rapport ainsi trouvé est 7,24; le rapport exact était 7,41; l'erreur est donc environ de $\frac{1}{40}$ (expérience faite avec plaque Lumière bleue).

J'ai cherché dans d'autres expériences à comparer deux sources lumineuses à des températures différentes, telles par conséquent que la position du maximum d'énergie dans leurs spectres soit différente, mais ne présentant pas la discontinuité produite par l'écran au sulfate de cuivre. Avec l'étalon à acétylène Fouché j'avais imprimé une échelle de teintes, puis à l'aide de cette échelle j'ai cherché à déterminer le rapport de deux éclairagements donnés avec une lampe à incandescence à filament de charbon. Le régime normal de la lampe était de 10 volts; j'ai fait l'expérience avec 9, 10, puis 11 volts. Même survoltée, la lampe est encore beaucoup plus rouge que l'étalon Fouché. Les résultats sont consignés dans le Tableau XII.

TABLEAU XII.

	9 volts.	10 volts.	11 volts.
Rapport mesuré.....	4,30	4,47	4,08
Rapport exact.....	4,21	4,35	3,97
Erreur commise (pour 100).	2,1	2,7	2,7

L'expérience a été faite avec des plaques As de Trèfle étiquette rouge. L'erreur est du même ordre que dans l'expérience précédente, mais de sens inverse. Cette erreur n'est pas négligeable; mais la différence de couleur entre l'étalon Fouché et les lampes électriques est très considérable. L'erreur est sensiblement la même pour les trois régimes de la lampe électrique; on peut en conclure que les différences de teintes correspondantes n'auraient pas eu d'effet sur la comparaison de ces lampes entre elles; la méthode de l'échelle de teintes aurait bien donné le rapport connu de l'énergie totale de leurs radiations actiniques.

Les différences qui existent dans la distribution de l'énergie dans les spectres des étoiles des divers types, sont au moins aussi grandes qu'entre l'étalon Fouché et la lampe électrique. Si l'on veut atteindre la précision du $\frac{1}{100}$ de grandeur en photométrie stellaire, on devra donc ne comparer que des étoiles du même type; on ne pourrait se servir d'une échelle de teinte formée avec une étoile bleue, par exemple, pour comparer avec précision les grandeurs d'étoiles jaunes.



CHAPITRE III.

ÉTUDE DE L'ÉTALON LUMINEUX FOUCHÉ, A ACÉTYLÈNE.



Les étalons lumineux pratiques, le Carcel, la lampe Heffner, la lampe au pentane, sont loin d'offrir toute la commodité que l'on demande à des organes d'un usage courant dans les laboratoires. La matière qu'ils consomment est souvent difficile à se procurer dans l'état de pureté exigée; leur réglage est délicat, leur couleur est très différente de celle des sources lumineuses les plus employées. Aucun de ces défauts ne peut être reproché à la lampe à acétylène

qui paraît *a priori* devoir fournir un étalon préférable aux autres, et qui les auraient supplantés, sans doute, si ces derniers n'avaient été les plus étudiés.

Si les étalons légaux ont fait l'objet de nombreuses recherches dans les différents laboratoires d'essais, l'étude de l'acétylène est restée confinée dans un milieu industriel. Il n'existe pas, à ma connaissance, de publication indiquant d'une manière précise jusqu'à quel point on peut compter sur la constance d'un étalon à acétylène, et comment il est influencé par les agents atmosphériques. C'est pour combler en partie cette lacune que j'ai entrepris les expériences que je vais décrire (1).

M. Violle paraît avoir été le premier à proposer l'emploi d'une flamme d'acétylène comme étalon lumineux. Il plaçait devant une flamme plate d'acétylène un diaphragme percé d'une ouverture rectangulaire qui ne laissait apercevoir que la région centrale de la flamme. Si ce système procure, pour le cours d'une expérience, une source lumineuse sensiblement constante, il n'est pas suffisamment défini pour constituer un étalon. L'éclat intrinsèque d'une flamme plate d'acétylène est très variable d'un point à un autre, comme on s'en rendra compte en la regardant à travers un verre fumé. Il varie avec l'épaisseur de la flamme. Or les flammes plates d'acétylène sont obtenues par l'écrasement l'un sur l'autre de deux jets d'acétylène convenablement inclinés. La forme de la nappe gazeuse et son épaisseur dépendent de la direction et de la vitesse des jets, et changent d'un bec à l'autre.

Malgré ces défauts, cet étalon a été utilisé par MM. Sheppard et Mees dans leurs très importantes recherches de sensitométrie. Ces savants l'ont d'ailleurs modifié en remplaçant la flamme plate par un jet unique. L'écran, du type Metween, était placé à 3^{mm} de la flamme et en laissait apercevoir la région la plus lumineuse. Des organes convenables permettaient de régler la hauteur de la flamme et la position de l'écran. Cette forme d'étalon est préférable à la précédente; les becs à jets sont aussi simples que les becs à flamme plate sont compliqués; les becs d'un lot, et par suite les jets qu'ils fournissent, sont pratiquement identiques. L'inconvénient de l'étalon de Sheppard et Mees est commun à toutes les lampes qui emploient l'écran Metween. Cet écran ne pouvant pas être superposé à la flamme même, ce ne sont pas les mêmes régions de la flamme qui rayonnent à travers l'écran dans deux directions différentes, et il est difficile de régler la position de l'écran par rapport à la flamme.

(1) Je tiens à remercier ici l'Office central d'Acétylène qui m'a fourni aimablement beaucoup de renseignements précieux, et qui m'a fait connaître les travaux de M. Ed. Fouché et de M. P. Moricheau-Beaupré.

L'étalon Ch. Féry ne prête pas à ces objections. L'image d'un jet d'acétylène est projetée sur un diaphragme percé d'une fente horizontale; cette fente est accolée à une lentille dont le foyer se trouve sur la lentille de projection. Un tel système optique fournit une source lumineuse très petite et un faisceau lumineux conique parfaitement bien délimité. Il permet d'appliquer la loi du carré de la distance à partir de 20^{cm} de la source. La flamme est réglée à une longueur donnée, et sa région la plus lumineuse se projette sur la fente du diaphragme. Cette région subit, par suite des variations de pression, des déplacements beaucoup plus faibles que l'extrémité de la flamme. Une fois le bec en place, de petites erreurs dans la longueur de la flamme n'ont pas d'influence sensible sur l'intensité de l'étalon. Le seul inconvénient de cet étalon, c'est que, pour l'établir, il faut disposer d'un autre étalon. Son intensité dépend en effet de la largeur de la fente, du diamètre et de la position de la lentille de projection, de la longueur de la flamme : autant de constantes difficiles à définir numériquement. Le bec et la lentille de projection étant en place, on règle la largeur de la fente pour donner à la lampe l'intensité choisie. La nécessité de cet étalonnage préalable empêchera la lampe Féry, malgré sa commodité, de devenir un étalon fondamental. Un autre inconvénient, moins grave, c'est que les grains de poussière qui se trouvent sur le condenseur ou sur le trajet du flux lumineux projettent leurs ombres sur l'écran photométrique. Ces taches peuvent passer inaperçues, et fausser les mesures.

L'étalon Fouché, au contraire, s'il demande un réglage un peu plus délicat, possède à un degré éminent les qualités d'un étalon fondamental. Tout le monde avec les ressources du laboratoire le plus modeste peut toujours le reproduire semblable à lui-même.

M. Fouché a fixé, dans un rapport au 4^e Congrès international des acétylénistes tenu à Liège en 1905, le principe de son étalon. Il utilise la flamme entière d'un bec à jet dont les dimensions sont définies, et qui brûle avec un débit constant. Il est clair que dans les mêmes conditions atmosphériques, avec de l'acétylène pur brûlant dans des becs identiques, le débit suffit à caractériser la flamme. L'avantage spécial de l'étalon Fouché, c'est qu'il n'est pas nécessaire d'utiliser des becs identiques; il suffit qu'ils n'aient pas des formes trop différentes. Le débit est déduit de la lecture d'un manomètre différentiel.

La combustion d'un corps bien défini et qu'on peut obtenir très pur, un réglage très facile, une réalisation mécanique extrêmement simple et qui ne demande aucune précision, ce sont là des avantages qu'on ne retrouve ni dans le Carcel, ni dans l'Heffner ou le d'Harcourt. L'étalon Féry est peut-être, une

fois construit, d'un maniement plus commode, mais le moindre dérèglement du bec, du condenseur ou du diaphragme nécessite un nouvel étalonnage. Avec le Fouché le seul accident qui peut se produire est l'encrassement du bec. Il suffit pour y remédier de remplacer le bec en usage par un autre qu'on trouvera partout ou que l'on construira sans difficultés.

Le détail des expériences de M. Fouché n'a malheureusement pas été publié. On ne leur a pas attribué leur importance réelle. J'ai été conduit à les reprendre pour justifier l'emploi de cet étalon en photométrie photographique. Peut-être mes expériences pourront-elles contribuer à faire considérer cet étalon comme le plus pratique et le plus sûr, et engageront-elles ceux qui ont l'outillage nécessaire à en poursuivre l'étude en photométrie visuelle.

ÉTUDES ANTÉRIEURES SUR L'ÉTALON FOUCHÉ.

Les recherches faites jusqu'ici sur l'étalon Fouché sont celles de M. Fouché résumées dans son rapport, et celles de M. P. Moricheau-Beaupré résumées dans une Note présentée au Congrès international de Photographie de Bruxelles en 1910.

Voici, presque littéralement, les passages du rapport de M. Fouché qui se rapportent à son étalon :

Principe. — Des becs ayant des orifices légèrement différents, mais réglés de manière à fournir tous le même débit, donnent des flammes de même intensité lumineuse lorsqu'on utilise la flamme entière.

Détermination de la forme du bec. — Il faut que les orifices n'aient pas des formes trop différentes.

Ainsi des becs faits avec du tube de thermomètre étiré ont donné une intensité uniforme de 0,48 carcel lorsqu'ils débitaient 6^l,2; les diamètres de leurs orifices étaient cependant assez différents pour que, sous une pression de 100^{mm} d'eau, ils débitassent de 7^l à 10^l à l'heure.

Des becs en métal blanc ayant des débits de 8^l à 11^l ont tous donné, pour 6^l,2, l'intensité de 0,44 carcel.

Des becs en stéatite de 8^l et des becs Bruncor en opaline ont donné aussi avec 6^l,2 0,44 carcel.

Les résultats différents entre les becs en tube de thermomètre et les autres montrent qu'il est nécessaire de spécifier la forme du bec. On pourrait adopter (*fig.* 16) :

Bec stéatite cylindrique, dessus plat;

Diamètre extérieur, 10^{mm};

Fond intérieur plat;

Épaisseur de la toile, 2^{mm} ;

Diamètre intérieur, environ $4^{\text{mm}}, 5$;

Orifice permettant un débit, sous 100^{mm} , de 8^{l} au minimum et de 10^{l} au maximum.

Appareil pour la fixation du débit du bec étalon. — Le procédé proposé par M. Fouché consiste à faire passer le gaz à travers un diaphragme préalablement taré D (*fig. 17*) avant que ce gaz ne parvienne au brûleur B. Un manomètre différentiel M a ses deux branches reliées avec la conduite, l'une avant le diaphragme, l'autre après. Le tarage préalable ayant indiqué quelle est la pression nécessaire pour assurer le débit requis, il suffit en manœuvrant le robinet R de faire marquer au manomètre M cette pression pour que le débit en question soit réalisé.

L'appareil, par l'adjonction d'un manomètre M', donne un moyen simple et immédiat de vérifier la partie la plus importante et la plus délicate du bec, la grandeur de l'orifice. Cette grandeur est définie par les deux limites admissibles pour le débit, sous une pression donnée, par exemple 8^{l} à 10^{l} sous 100^{mm} . Si deux becs possédant respectivement ces débits limites sont placés sur l'appareil, le robinet R étant réglé pour amener la pression voulue sur le diaphragme (manomètre M), le manomètre M' indiquera pour chacun d'eux une pression différente; ces deux pressions seront les limites de la pression admissible pour le bec, et tout bec qui accusera pour le débit fixé une pression en dehors de ces limites devra être rejeté.

Cela permettra non seulement de choisir le bec convenable pour servir d'étalon, mais encore de s'assurer que ce bec est en bon état, et de constater le moment où, par suite d'encrassement, il est devenu hors d'usage.

Tarage des diaphragmes. — Le diaphragme doit être étalonné de façon qu'on sache exactement que, sous une pression h , à la température t , il débite un volume v d'acétylène pur et sec.

Le gaz est fourni par un petit gazomètre pourvu d'un siphon compensateur de manière à s'écouler sous pression constante pendant la durée de la mesure. Il traverse le diaphragme à tarer, puis s'échappe par un tube dirigé vers le bas dans un vase de Mariotte rempli d'eau. Au fur et à mesure que le gaz pénètre dans le vase de Mariotte, une quantité d'eau équivalente s'écoule par le déversoir. Il suffit de peser l'eau ainsi écoulée pour en déduire le volume du gaz qui a traversé le diaphragme.

A cause de la solubilité assez grande de l'acétylène dans l'eau, la mesure se fait avec de l'air, et l'on en déduit facilement celle qui correspond à l'acétylène, les débits étant en raison inverse des racines carrées des densités.

Les expériences effectuées par M. Moricheau-Beaupré confirment le principe de M. Fouché. Les becs du type spécifié par M. Fouché fournissent la même intensité lumineuse lorsqu'ils débitent la même quantité d'acétylène, quoique la pression du gaz à la sortie varie d'un bec à l'autre. M. Moricheau-Beaupré

indique quelques résultats concordant au millième de carcel, mais c'est là sans doute, une précision accidentelle.

Il a étudié un point très important, l'influence des impuretés de l'acétylène et en particulier l'influence de l'acétone. L'acétone se trouve dans le gaz fourni par les bouteilles d'acétylène dissous, en proportion d'autant plus grande que la bouteille se vide davantage. Cet acétone produit une diminution de l'intensité lumineuse de la flamme. Pour des pressions dans la bouteille de

10 ^{kg}	4 ^{kg}	2 ^{kg}
------------------	-----------------	-----------------

l'intensité lumineuse d'un même bec serait, en carcels,

0,732	0,726	0,684
-------	-------	-------

En alimentant un bec avec de l'acétylène pur ou avec de l'acétylène saturé d'acétone par barbotage, l'auteur a trouvé comme intensités lumineuses :

Acétylène pur.....	0,559
Acétylène saturé d'acétone	0,450

L'intensité du bec précédent alimenté avec de l'acétylène saturé d'acétone à 23° et purifié par barbotage dans du bisulfite de soude est remontée de 0,450 à 0,559.

L'acétylène saturé d'humidité à 25° fournit la même intensité lumineuse que l'acétylène séché au chlorure de calcium. Il n'y a pas de différence résultant de l'emploi de l'acétylène pur ou de l'acétylène impur, mais privé d'air.

La hauteur d'une flamme réglée pour un débit déterminé change avec la proportion d'air contenu dans l'acétylène :

	Hauteur de la flamme.
Acétylène pur.....	47 ^{mm} , 5
Acétylène et 8 pour 100 d'air.....	44 ^{mm} à 45 ^{mm}

SOMMAIRE DES RECHERCHES ACTUELLES.

Pour justifier l'emploi de l'étalon Fouché il y avait lieu, d'après les recherches dont je viens de rendre compte, d'étudier l'influence des agents atmosphériques. Il m'a paru utile aussi de répéter les expériences de nos prédécesseurs, pour fixer plus exactement la précision que l'on peut attendre.

Les questions particulières que j'ai cherché à résoudre sont les suivantes :

1° Comment varie avec le débit l'intensité lumineuse fournie par un bec donné ?

2° Quelles sont les intensités lumineuses relatives de différents becs brûlant sous le même débit ?

3° Quelle est l'influence des impuretés de l'acétylène, et en particulier de l'acétone ?

4° Quelle est l'influence, sur la flamme, de la pression atmosphérique et de l'humidité de l'air ?

5° Quelle méthode faut-il employer pour mesurer le débit du bec ?

Méthode photométrique. — J'ai constamment employé la méthode photographique de l'échelle de teintes. Je me suis servi de plaques Lumière bleues, non orthochromatisées ou de plaques Joula bande bleue. Les résultats obtenus se rapportent donc à l'ensemble des radiations auxquelles elles sont sensibles, principalement aux radiations voisines de leur maximum de sensibilité vers $\lambda 430^{\text{m}\mu}$.

Une même plaque, portant une échelle de teintes latente, pouvait servir pour la comparaison de plusieurs sources lumineuses. Chacune de celles-ci impressionnait les bandes intercalées sur des portions différentes de leurs longueurs, des caches de papier noir épais protégeant dans les insulations successives les régions de la plaque à réserver. Pour éliminer autant que possible l'influence de l'instabilité de l'image latente, les impressions étaient croisées. La comparaison de deux éclairagements a et b reposait sur trois impressions $a-b-a$, l'intervalle de temps séparant les deux premières étant égal à l'intervalle séparant les deux autres. Une expérience préliminaire grossière avait indiqué à quelle distance des lampes il fallait placer la plaque pour que les éclairagements fussent à peu près égaux. On peut penser que, puisque les insulations produites par les diverses sources étaient presque les mêmes, tous les agents perturbateurs auront eu, entre l'impression et le développement, la même influence sur les images latentes.

L'échelle de teintes était imprimée avec une source auxiliaire plusieurs jours avant l'expérience ; elle ne servait que sur une étendue très restreinte ; la portion de courbe caractéristique utilisée était sensiblement une droite, ce qui facilitait les réductions. L'échelle de teintes a été formée dans presque toutes mes expériences avec des éclairagements croissant sensiblement en progression géométrique de raison 1, 2 (¹).

(¹) Le rapport de deux éclairagements successifs n'a pas toujours été rigoureusement 1, 2, parce que les taquets qui fixaient sur le banc d'optique la position du châssis photométrique ne pouvaient occuper que des logements situés à 1^{er} les uns des autres.

Le rapport des éclairéments des bandes extrêmes d'une échelle imprimée sur plaque 9×12 était de $1,2^{12} = 9$.

Les caches de papier noir portaient des fentes de direction perpendiculaire aux bandes et de 1^{cm} de largeur. La première et la dernière avaient une largeur de $1^{\text{cm}},5$, pour permettre de ne pas faire de mesure d'opacité tout au bord de la plaque.

Les bandes intercalées pouvaient ainsi être imprimées en 7 fois sur une plaque 9×12 . Ces sept séries sont désignées, dans les Tableaux, dans l'ordre où elles ont été impressionnées, par les lettres *a, b, c, d, e, f, g*. L'expérience photométrique terminée, le cliché était placé dans une boîte en bois à rainures, où il restait dans l'obscurité jusqu'au moment du développement, un ou deux jours après.

DESCRIPTION DES BECS UTILISÉS DANS LES EXPÉRIENCES.

J'ai utilisé les becs du commerce, becs simples ou becs à entraînement d'air, et un bec métallique que j'avais construit moi-même.

Les becs simples sont des becs où l'orifice débouche directement dans l'atmosphère, la partie du bec où il est percé, la toile, ne présentant aucune saillie qui entoure l'orifice. Ceux qui m'ont servi sont :

1° Un bec Bullier de débit nominal de 5 litres sous une pression de 80^{mm} d'eau. La section de ce bec est représentée figure 18; l'épaisseur de la toile est de $1^{\text{mm}},5$. Le fond du canal intérieur est conique; l'orifice est percé au sommet du cône.

2° Un bec Held de 5 litres et un bec Held de 3 litres (*fig. 19*). La toile de ces becs a une épaisseur de $0^{\text{mm}},9$ environ; le fond du canal intérieur est sensiblement plan. Le diamètre extérieur de la calotte hémisphérique qui termine le bec est sensiblement le même que celui de la calotte du bec Bullier.

3° Un bec Bray d'un débit de 1 litre (*fig. 20*). Les becs Bray sont formés d'un disque plat de stéatite de $8^{\text{mm}},5$ de diamètre et de $3^{\text{mm}},5$ d'épaisseur serti à l'extrémité d'un tube de laiton.

4° Un bec métallique (*fig. 21*). Ce bec a été combiné pour être facilement construit dans tout atelier de laboratoire. Un disque métallique (1) (maillechort dans l'espèce) sert de toile au bec; l'orifice est au centre; il repose sur la tranche bien plane d'un tube épais (2) contre laquelle il est maintenu par une bague vissée (3). Le joint entre le disque et le tube est rendu étanche par de la

pâte de cêruse contenue dans des stries concentriques creusées dans la tranche du tube (2).

Dans les becs à entraînement d'air (*fig. 22*), la toile (1) est surmontée d'une calotte (2) percée d'une ouverture d'un diamètre très supérieur à celui de l'orifice proprement dit. Entre cette calotte et la toile se trouvent des canaux d'appel d'air (3) très larges; la flamme est ainsi rejetée à l'ouverture de la calotte; elle est plus large que celle des becs simples; l'orifice ne s'encrasse pas. Dans le bec à entraînement que j'ai utilisé, les canaux d'appel d'air ne sont pas creusés au-dessous de la calotte; la calotte, tronc de cône de 2^{mm}, 5 d'épaisseur, repose directement sur la toile; elle est creusée de deux fentes en croix de 0^{mm}, 5 de large. La rencontre de ces deux fentes se fait sur un trou de 1^{mm}, 5 de diamètre.

RELATION ENTRE LE DÉBIT D'UN BEC ET L'INTENSITÉ DE LA FLAMME.

Les expériences ont porté sur trois becs simples : le bec Bullier et les deux becs Held. Pour chaque bec j'ai fait deux séries d'expériences, l'une avec des débits croissants, l'autre avec des débits décroissants, les époques des expériences aux mêmes débits étant symétriques par rapport à l'époque moyenne.

Les impressions de chaque série ont été faites sur une même plaque (Jougla bande bleue). Chaque plaque a été développée 24 heures après la dernière pose.

Les résultats sont reportés Tableau XIII. Les colonnes ont les significations suivantes :

- I. Numéro de la plaque et nature du bec.
- II. Numéro d'ordre de la région utilisée sur les bandes intercalées.
- III. Pression du bec en millimètres de xylol.
- IV. Lectures du manomètre différentiel, proportionnelles aux débits (déplacement de la colonne liquide en millimètres).
- V. Débits normaux.
- VI. Distances de la plaque à la lampe en centimètres.
- VII. Numéro d'ordre de la bande fictive d'égal éclairément.
- VIII. Intensité de la lampe en fonction de celle qui a servi pour l'impression de l'échelle de teintes.
- IX. Corrections additives pour faire correspondre les intensités aux débits normaux.

X. Intensités corrigées.

XI. Intensités de la lampe, en prenant comme unité l'intensité au débit 404.

Les débits des expériences conjuguées n'ont pas été exactement égaux; le robinet rhéostat dont je disposais n'était pas assez sensible pour permettre de régler rapidement le débit à une valeur donnée, et l'intervalle de temps entre les expériences d'une série devait avoir une valeur définie. Une première réduction des observations montre que le débit D et l'intensité I sont liés par une relation de la forme

$$I = a + b D = b(D - d_0);$$

d'où

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta(D - d_0)}{D - d_0}.$$

On peut par cette formule ramener à une même valeur les intensités observées dans les expériences conjuguées. La colonne V contient les valeurs des débits adoptées pour cette réduction.

Les valeurs des intensités contenues colonne VIII sont les résultats bruts des mesures; elles ont pour unité l'intensité de l'étalon auxiliaire qui a servi pour l'impression de l'échelle de teintes, en supposant que les images latentes de l'échelle de teintes ne soient pas modifiées entre leurs impressions et l'expérience (1).

Les graphiques de la figure 23 représentent les observations faites avec les divers becs en prenant comme unité de débit le débit 404. Les points représentatifs des expériences successives d'une série sont reliés par des droites. Les expériences peuvent, au degré de précision des expériences, être représentées par des droites

$$I = a + b D.$$

Pour déterminer les coefficients a et b , j'ai pris pour chaque bec, comme valeur de I , la moyenne des valeurs conjuguées, et j'ai traité les équations obtenues par la méthode des moindres carrés. Les trois premières séries d'expériences ont donné ainsi les équations :

Bullier 5 litres.....	$I = -0,244 + 1,248 D = 1,248 (D - 0,196)$
Held 5 litres.....	$I = -0,260 + 1,255 D = 1,255 (D - 0,208)$
Held 3 litres.....	$I = -0,285 + 1,279 D = 1,279 (D - 0,223)$

(1) J'ai rapporté les intensités des flammes obtenues avec les divers becs au débit 404 parce que les expériences correspondant à ce débit étaient particulièrement satisfaisantes.

TABLEAU XIII.

I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.	XIII.
25. Bullier, 5 ¹	<i>a</i>	41	210,4	210	144	4,97	0,690	— 0,001	0,689	0,381	— 16	— 9
	<i>d</i>	67	287,4	285	174	4,33	1,138	— 0,010	1,128	0,628	— 1	+ 2
	<i>e</i>	91	349,9	349	191	3,84	1,507	— 0,004	1,503	0,838	+ 12	+ 12
	<i>f</i>	115	406,3	404	228	4,75	1,804	— 0,010	1,794	1,000	+ 6	+ 2
	<i>g</i>	156	520,6	518	275	5,25	2,388	— 0,012	2,376	1,324	— 19	— 30
26. Bullier, 5 ¹	<i>a</i>	140	461,4	460	275	5,85	2,136	— 0,006	2,130	1,166	+ 1	+ 6
	<i>c</i>	114	405,1	404	250	5,65	1,829	— 0,005	1,824	1,000	+ 6	+ 2
	<i>d</i>	92	349,9	349	191	3,72	1,512	— 0,004	1,538	0,834	+ 8	+ 8
	<i>e</i>	67	287,4	285	174	4,15	1,181	— 0,010	1,171	0,641	+ 12	+ 16
	<i>f</i>	42	210,9	210	144	4,72	0,724	— 0,003	0,721	0,395	— 5	+ 2
	<i>g</i>	26	156,9	157	121	5,81	0,417	0,000	0,417	0,229	— 8	+ 2
27. Held, 5 ¹	<i>a</i>	146	517,5	518	275	5,24	2,393	+ 0,002	2,395	1,346	+ 2	— 8
	<i>b</i>		460,3	460	275	6,01	2,070	— 0,001	2,069	1,164	0	— 8
	<i>c</i>	101	404,0	404	250	5,80	1,778	0,000	1,778	1,000	+ 9	+ 2
	<i>d</i>	80	349,3	349	191	4,00	1,462	— 0,001	1,461	0,820	— 1	— 6
	<i>e</i>	56	285,0	285	174	4,50	1,102	0,000	1,102	0,619	— 3	— 7
	<i>f</i>	34	207,3	210	144	5,01	0,684	+ 0,006	0,690	0,388	— 2	— 5
	<i>g</i>	20	156,3	157	121	6,21	0,388	0,002	0,390	0,219	— 8	— 8
28. Held, 5 ¹	<i>a</i>	21	157,0	157	121	6,08	0,396	0,000	0,396	0,222	— 5	— 5
	<i>b</i>	35	210,0	210	144	4,85	0,706	0,000	0,706	0,396	+ 6	+ 3
	<i>c</i>	56	285,8	285	191	5,12	1,180	— 0,003	1,177	0,661	+ 39	+ 35
	<i>d</i> (*)...	79	350,3	349	228	5,37	1,603	— 0,003	1,600	0,897		
	<i>e</i>	100	403,6	404	250	5,79	1,782	+ 0,002	1,784	1,000	+ 9	+ 2
	<i>f</i>	124	460,0	460	275	6,03	2,065	0,000	2,065	1,159	— 6	— 13
	<i>g</i>	148	518,3	518	275	5,40	2,323	— 0,001	2,322	1,300	— 44	— 54
29. Held, 3 ¹	<i>a</i>	14	98,8	98	121							
	<i>b</i>	33	160,3	157	121	7,69	0,299	— 0,006	0,293	0,219	+ 5	— 8
	<i>c</i>	51	208,8	210	144	6,73	0,502	0,000	0,502	0,376	— 5	— 17
	<i>d</i>	80	284,3	285	191	7,07	0,832	+ 0,002	0,834	0,624	+ 6	— 2
	<i>e</i>		348,0	349	228	7,48	1,102	+ 0,003	1,105	0,826	+ 5	0
	<i>f</i>	137	404,6	404	250	7,44	1,334	— 0,002	1,332	1,000	+ 6	+ 2
	<i>g</i>	167	460,7	460	275	7,70	1,514	— 0,002	1,512	1,133	— 39	— 39
30. Held, 3 ¹	<i>a</i>	167	459,8	460	275	7,44	1,615	+ 0,001	1,616	1,180	+ 8	+ 8
	<i>b</i>	137	403,8	404	250	7,30	1,368	+ 0,001	1,369	1,000	+ 6	— 2
	<i>c</i>	109	346,6	349	228	7,33	1,133	+ 0,008	1,141	0,832	+ 9	+ 6
	<i>d</i>	78	283,3	285	191	6,90	0,859	+ 0,005	0,864	0,631	+ 13	+ 5
	<i>e</i>	49	208,3	210	144	6,72	0,504	+ 0,004	0,508	0,371	— 10	— 21
	<i>f</i>	32	156,3	157	121	8,22	0,270	+ 0,001	0,271	0,198	— 16	— 29
	<i>g</i>	14	97,8	98	121							
32. Held, 5 ¹	<i>a</i>	147	519,0	518	275	6,63	1,867	— 0,003	1,864	1,350		
	<i>b</i>	120	459,3	460	275	7,44	1,615	+ 0,002	1,617	1,172		
	<i>c</i>	98	402,5	404	250	7,28	1,374	+ 0,005	1,379	1,000		
	<i>d</i>	76	348,5	349	228							
	<i>e</i>	55	283,5	285	174							
	<i>f</i>	34	214,0	210	144							
	<i>g</i>	24	177,3	177	110	6,20	0,321	— 0,001	0,320	0,232		

TABLEAU XIII (suite).

I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.	XIII.
33. Held, 5 ¹	a.....	24	176,5	177	110	5,17	0,387	+ 0,001	0,388	0,277		
	b.....	34	207,7	210	144	6,37	0,535	+ 0,005	0,540	0,385		
	c.....	56	284,5	285	174	5,80	0,861	+ 0,001	0,862	0,617		
	d.....	77	348,0	349	228	7,12	1,175	+ 0,003	1,178	0,841		
	e(*)...	98	399,5	404	250	7,23	1,383	+ 0,016	1,399	1,000		
	f.....	120	459,0	460	275	7,34	1,644	+ 0,004	1,648	1,178		
	g.....	147	518,0	518	275	6,84	1,799	0,000	1,799	1,285		

La deuxième série d'expériences faites avec le bec Held 5 litres donnerait

$$I = -0,294 + 1,288 D,$$

mais les expériences inutilisables (colonnes en blanc) y sont trop nombreuses pour qu'on puisse attribuer à cette série le même poids qu'aux autres (').

La colonne XII contient les résidus calculés pour chaque expérience à l'aide de la formule correspondante; la colonne XIII les résidus calculés à l'aide d'une formule

$$(A) \quad I = -0,262 + 1,262 D = 1,262 (D - 0,208)$$

dont les coefficients sont les moyennes de ceux des trois premières.

L'examen des signes des résidus montre que la relation entre l'intensité et le débit n'est pas linéaire, et qu'il faudrait y introduire des termes de second ordre; mais les observations ne sont pas assez précises pour en permettre la détermination.

Les résidus fournis par la formule moyenne ne sont pas beaucoup plus grands que ceux des formules primitives; on peut en conclure que la loi des intensités en fonction des débits est très sensiblement la même pour les trois becs : *L'intensité de la flamme est proportionnelle au débit, l'origine des débits étant non zéro, mais d_0 .*

La lecture 404^{mm} du manomètre correspond à un débit de 6^l,750 à l'heure. C'est ce débit que nous avons pris pour unité. En exprimant les débits en litres à l'heure, la formule A devient

$$(B) \quad I = -0,262 + \frac{1,262}{6,750} D = -0,262 + 0,187 D.$$

(¹) Bien entendu les derniers chiffres significatifs des coefficients des formules précédentes ne sont inscrits qu'à titre d'indication.

L'unité d'intensité est celle du bec débitant 6^l,750 à l'heure. Il conviendrait de prendre comme unité d'intensité celle d'un bec de 10 bougies décimales; mais je n'ai pas eu à ma disposition d'étalons légaux me permettant de faire ce changement d'unité.

Pour simplifier les calculs on peut prendre pour intensité unité celle d'un bec débitant 5 litres à l'heure à la pression normale. La formule devient alors

$$(C) \quad I = -0,389 + 0,278 D = 0,278 (D - 1^l,400).$$

L'origine de ce débit 1^l,400 peut être interprétée en examinant comment se modifie la flamme d'un bec à jet. Au voisinage de l'orifice elle a la forme d'un tronc de cône renversé; la surface est bleue et paraît servir de gaine au jet gazeux non enflammé. Au-dessus du tronc de cône vient une partie cylindrique de 3^{mm} de diamètre environ dont la couleur varie légèrement d'une extrémité à l'autre; d'un blanc éblouissant vers la base, elle devient plus rouge au sommet. Le sommet de la flamme est un cône rougeâtre, dans l'axe d'une nappe cylindrique lumineuse. Quand le débit augmente la flamme s'allonge, mais les diverses régions semblent conserver les mêmes longueurs relatives, sauf lorsque le débit est très faible. En ce cas la flamme est surtout formée d'une base conique bleue; une petite tache sphéroïdale jaune se forme lorsque le débit est un peu plus grand. Quand le débit atteint la valeur 1^l,400 la partie cylindrique est nettement formée. On peut donc admettre que ce débit 1^l,400 est celui à partir duquel les diverses régions de la flamme s'allongent proportionnellement de la même quantité.

COMPARAISON DES INTENSITÉS DE DIVERS BECS.

Les becs comparés ont été des becs simples : le bec Bullier de 5 litres, les deux becs Held de 5 et de 3 litres, le bec Bray de 1 litre, et le bec métallique.

Les impressions ont été faites sur plaques Joula bandes bleues. Dans chacune des séries d'expériences, les becs Bullier et Held ont été étudiés deux fois, à des époques symétriques par rapport à l'époque moyenne. Le bec Bray a été étudié à l'époque moyenne de la première série, le bec métallique à l'époque moyenne de la seconde.

Dès qu'un bec avait servi, je le remplaçais par le suivant, et je laissais passer une demi-heure avant la pose photométrique pour permettre à l'air introduit dans la canalisation par le changement du bec de s'écouler complètement, et à la flamme de prendre son régime normal.

Les résultats sont reportés dans le Tableau XIV où les colonnes ont les significations suivantes :

I. Numéro d'ordre de l'expérience.

II. Nom du bec :

H = Held, B = Bullier.

III. Pression sur le bec en millimètres de xylol.

IV. Lectures du manomètre différentiel de débit (déplacements de la colonne en millimètres).

V. Intensité de la flamme en fonction de l'étalon auxiliaire de l'échelle de teintes.

Pour la série d'expériences 31, où les débits des becs ont été peu différents, je donne les résultats bruts des expériences. Pour la série 35 les résultats ont été corrigés pour les faire correspondre au débit 254,5.

VI. Moyenne des intensités données pour chaque bec par les expériences conjuguées. Le nombre 0,900 inscrit pour le bec Bray correspond au débit 283 et a été obtenu en supposant que la formule $I = -0,263 + 1,261 D$ s'applique à ce bec.

VII. Intensités en fonction de celles du bec Bullier 5 litres.

TABLEAU XIV.

I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.
31a.	H ₃	74	283,4	0,851	0,849	0,967	35a.	H ₃	72	255,5	0,894	0,901	0,972
b.	H ₅	56	283,2	0,877	0,861	0,981	b.	H ₅	55	257,5	0,895	0,887	0,957
c.	B ₅	65	282,7	0,893	0,878	1,000	c.	B ₅	67	256,0	0,928	0,927	1,000
d.	Bray	197	207,7	0,540	0,900	1,025	d.	Métal.	33	257,3	0,800	0,800	0,862
e.	B ₅	65	282,3	0,863			e.	B ₅	65	254,5	0,925		
f.	H ₅	55	282,0	0,845			f.	H ₅	54	254,5	0,879		
g.	H ₃	73	283,0	0,847			g.	H ₃	73	254,5	0,908		

On peut conclure de ces expériences que l'intensité de la flamme donnée par bec simple, pour un débit donné, dépend moins de la pression du gaz sur le bec que de la forme de l'orifice. Les becs Held de 5 et de 3 litres donnent la même intensité, à la limite de précision des expériences. Le bec Bullier de 5 litres, qui, pour un même débit, exige une pression d'acétylène intermédiaire entre celles des deux becs Held, a une intensité nettement supérieure. En admettant la légitimité de l'application de la formule au bec Bray, ce bec aurait une intensité encore plus grande. Par contre, le bec métallique aurait une intensité plus faible. Les intensités des flammes données par ces divers becs croissent dans le même sens que l'épaisseur de la toile du bec. Dans les becs Held, l'épaisseur et

la forme de la toile sont les mêmes ; seuls les diamètres de leurs orifices sont différents ; pour un même débit la vitesse de l'acétylène à la sortie est plus grande avec le bec de 3 litres qu'avec celui de 5 litres. Les deux becs donnant la même intensité, il paraît démontré que l'éclat de la flamme change peu avec la vitesse de l'acétylène à la sortie. La forme du jet, qui varie avec l'épaisseur de la toile, paraît plus importante pour modifier la proportion d'air et d'acétylène dont dépend l'éclat de la flamme.

La conclusion pratique, c'est que le débit ne suffit pas pour caractériser l'éta-
lon Fouché ; il faut de plus fixer la forme du bec. Par contre, la donnée la plus difficile à reproduire exactement, le diamètre de l'orifice, est, dans de larges limites, indifférente. Lorsqu'un bec s'encrasse on ne doit donc pas craindre de le nettoyer avec un équarisseur ; la modification de forme du jet à la sortie, produite par le dépôt charbonneux, est plus à craindre que l'augmentation du diamètre.

La forme du bec la plus facile à reproduire avec l'outillage ordinaire des laboratoires paraît être celle du bec métallique que j'ai décrit plus haut ; l'expérimentateur peut le construire lui-même. Malheureusement le métal s'oxyde au contact de la flamme, et dans une expérience un peu prolongée on peut craindre que l'orifice ne soit brûlé ou ne se déforme. Un disque plat en stéatite serait bien préférable à celui de maillechort. La forme de bec proposée par M. Fouché paraît excellente. Si l'on veut adopter un des becs du commerce, il faudrait choisir un bec du type Bray où la toile est très épaisse ; les variations inévitables d'un bec à l'autre sont alors négligeables.

INFLUENCE DES IMPURETÉS DE L'ACÉTYLÈNE.

L'acétylène obtenu par l'action de l'eau sur le carbure de calcium contient des impuretés susceptibles de modifier son pouvoir éclairant, et de provoquer un encrassement rapide du bec. On possède heureusement des épurateurs excellents, à base d'acide chromique, qui les suppriment pratiquement. Mais ces épurateurs laissent subsister l'impureté la plus grave au point de vue photométrique, l'air qui remplit, avant le dégagement de l'acétylène, le générateur, le gazomètre et la canalisation. Il est indispensable de brûler un volume d'acétylène égal à plusieurs fois celui de ces récipients pour pouvoir compter que tout l'air aura été chassé. Les bouteilles d'acétylène dissous dont je me suis servi sont, sous ce rapport, le générateur le plus sûr ; grâce à leur manomètre détenteur elles fournissent l'acétylène à une pression constante ; elles servent ainsi à

la fois de générateur et de gazomètre; on n'a plus à se préoccuper que de chasser l'air de la canalisation. L'acétone ne dissout d'ailleurs les impuretés de l'acétylène qu'en proportion infime; il n'y a donc pas lieu d'éliminer celles qui peuvent rester.

Si les bouteilles d'acétylène dissous ne contiennent guère les impuretés ordinaires de l'acétylène, elles introduisent, en grande quantité, une impureté nouvelle, l'acétone. La proportion d'acétone qui sort de la bouteille, presque nulle quand la bouteille est pleine, devient tout à fait notable quand elle est presque vide. Son influence sur l'éclat de la flamme est donc variable d'un moment à l'autre, il faut la rendre constante. On y parvient de deux façons différentes: soit en absorbant l'acétone par le bisulfite de soude, soit en saturant par barbotage l'acétylène d'acétone. Il faut choisir celui de ces deux procédés qui donne les résultats les plus constants.

Le barbotage de l'acétylène dans le bisulfite de soude introduit dans le gaz de l'acide sulfureux en quantité d'autant plus grande que la température est plus élevée. De plus la tension de vapeur de l'acétone dissous dans l'acétylène dépend de la température.

Mes expériences ont consisté à comparer les intensités de flammes obtenues avec de l'acétylène qui a barboté soit dans de l'acétone, soit dans du bisulfite à diverses températures, ou qui provenait de bouteilles pleines ou presque vides.

Les poses sur plaques Jouglé bandes bleues ont été faites à des intervalles de temps égaux, en général 30 minutes. La première colonne des Tableaux suivants caractérise la nature du gaz; la deuxième contient les intensités lumineuses observées dans chaque expérience en fonction de l'étalon auxiliaire de l'échelle de teintes; la troisième la moyenne des intensités déduites des deux expériences conjuguées; la quatrième les intensités exprimées en fonction de celle qu'on déduit de l'une des expériences considérées.

TABLEAU XV.

Acétylène saturé ou débarrassé d'acétone.

Sans acétone	1,09	1,08	1,00
Saturé d'acétone à 13° C.....	0,86	0,86	0,80
Sans acétone.....	1,06		

TABLEAU XVI.

Acétylène saturé d'acétone à diverses températures.

Acétylène saturé à 13°.....	1,01	0,995	1,00
Acétylène saturé à 28°.....	0,955	0,955	0,96
Acétylène saturé à 13°.....	0,979		

TABLEAU XVII.

Acétylène lavé dans le bisulfite à diverses températures.

Bisulfite à 13°.....	0,995	0,971	1,00
Bisulfite à 28°.....	0,953	0,954	0,99
Bisulfite à 13°.....	0,948		

TABLEAU XVIII.

Acétylène provenant de bouteilles à diverses pressions.

Bouteille pleine (10 ^{kg}), acétylène non lavé....	0,984	0,976	1,00
Bouteille vide (2 ^{kg}), acétylène non lavé.....	0,916	0,915	0,94
Bouteille vide, acétylène lavé dans le bisulfite.	0,995	0,984	1,01
Bouteille pleine, acétylène lavé.....	0,971	0,971	1,00
Bouteille vide, acétylène lavé.....	0,973		
Bouteille vide, acétylène non lavé.....	0,914		
Bouteille pleine, acétylène non lavé.....	0,968		

Ces quatre séries d'expériences montrent que la présence de l'acétone dans l'acétylène change d'une façon tout à fait notable l'intensité de la flamme.

Il n'y a pas lieu de chercher à corriger l'influence de l'acétone en saturant l'acétylène, car la variation de la quantité d'acétone introduite ainsi aux diverses températures où les expériences de photométrie peuvent se faire est suffisante pour modifier l'intensité de la flamme.

L'élimination de l'acétone par le bisulfite est pratiquement suffisante; l'influence de la température du bisulfite est négligeable.

Le gaz fourni par une bouteille pleine possède une intensité lumineuse notablement plus grande que celui que fournit une bouteille presque vide; cette intensité est sensiblement la même, que l'acétylène soit lavé dans le bisulfite ou non.

L'acétylène, dans le flacon de barbotage, se dégageait sous une couche de bisulfite de 5^{cm} d'épaisseur par un tube de 3^{mm} de diamètre.

INFLUENCE DE LA PRESSION ATMOSPHÉRIQUE.

Pour ne pas être obligé d'attendre des conditions atmosphériques exceptionnelles et pour rendre l'influence de la variation de pression nettement prédominante, j'ai mesuré l'intensité de cette flamme dans des stations d'altitudes très diverses :

B.

	Altitude.	Pression.
	^m	^{mm} et ^{mm}
Observatoire de Paris.....	63	760 et 767
Laissac (Aveyron).....	600	720 ^{mm}
Observatoire de l'Aigoual.....	1567	637
Observatoire du Pic du Midi.....	2870	540

Dans chacune de ces stations j'ai comparé, à une lampe électrique étalon, la lampe Féry et la lampe Fouché, munies chacune successivement du bec normal de la lampe Féry, d'un bec à jet simple, et d'un bec à jet à entraînement d'air. Le bec Féry malheureusement a été mis hors d'usage avant la fin des expériences.

Étalon électrique. — On sait combien les lampes électriques sont sensibles aux moindres variations de régime du courant. Pour les utiliser comme étalons, il faut maintenir constante, à un millième près, la tension aux bornes de la lampe. Les appareils de mesure qui permettent d'atteindre cette précision auraient difficilement supporté le transport. Aussi ai-je employé, pour vérifier la constance du courant, une méthode de zéro très pratique due à M. Ch. Fabry. Cette méthode diminue le plus possible l'influence des variations lentes et progressives avec l'âge de la lampe. Si l'on se contentait de maintenir la tension constante, la puissance $\frac{e^2}{R}$ dépensée dans la lampe diminuerait avec le temps, et la lampe faiblirait; si l'on maintenait l'intensité constante, la puissance Ri^2 augmenterait, la lampe brillerait davantage. M. Ch. Fabry se propose de maintenir constante, non la tension ou l'intensité, mais la puissance.

Dans le circuit de la lampe, on place un rhéostat de réglage h et une faible résistance constante r (*fig.* 24). Aux bornes de la lampe, on branche en dérivation un circuit formé de deux résistances a et b ; on maintient constante la différence de potentiel E entre les points M et N . On fait ainsi travailler la lampe à un régime qui n'est ni à tension constante (il faudrait maintenir constante la différence de potentiel V aux bornes de a), ni à intensité constante (il faudrait maintenir constante la différence de potentiel V' aux bornes de r), mais intermédiaire entre ces deux régimes, puisqu'on maintient constante la somme $V + V'$. Par un choix convenable de résistance, il est facile de maintenir constante la puissance, du moins pour des variations modérées de la résistance de la lampe. On choisit la différence de potentiel entre M et N de telle façon qu'elle soit équilibrée par la force électromotrice d'une pile étalon. On intercale entre M et N un circuit dérivé comprenant la pile E , un interrupteur K et un

galvanomètre G. La lampe est à son régime lorsqu'en fermant l'interrupteur le galvanomètre reste immobile.

Mon étalon électrique devant être facilement transportable, j'ai dû employer des lampes à faible voltage; j'ai choisi des lampes de 10 volts dont l'observatoire est abondamment pourvu. Je m'étais d'abord proposé d'employer des lampes claires pour pouvoir plus facilement m'assurer de la propreté de leurs surfaces; mais leur emploi comporte une cause d'erreur qu'il m'a été impossible d'éviter : toutes les irrégularités de l'ampoule, tous les défauts du verre, produisent des ombres dans le flux lumineux. Ces ombres, qui sont bien visibles quand on éclaire de très près, avec la lampe, une feuille de papier, se retrouvent à toutes distances. Dans un lot d'une cinquantaine de lampes, il m'a été impossible d'en trouver une dont le flux lumineux en soit dépourvu dans un angle solide suffisamment grand. Le seul remède était d'employer des lampes dépolies.

Les lampes dépolies de ce voltage que j'ai trouvées dans le commerce étaient simplement recouvertes d'un vernis laiteux; c'est avec elles que j'ai fait une série de mesures à Laissac et au Pic en 1910 (1). Mais malgré tout le soin que j'ai apporté au maniement de ces lampes, je n'ai pu éviter des taches sur le vernis. J'ai pu, heureusement, recommencer mes expériences en 1911 et 1912; j'ai abandonné alors les lampes vernies du commerce et j'ai utilisé des lampes que j'avais dépolies moi-même à l'émeri.

Si le dépoli supprime les inconvénients provenant des irrégularités du verre de l'ampoule, il introduit une nouvelle cause d'erreur assez grave; le filament incandescent se dilate et se déforme peu à peu; il se rapproche ainsi ou s'éloigne de la paroi diffusante de la lampe, paroi qui est la vraie source lumineuse. L'éclat intrinsèque de cette paroi est ainsi sujet à des variations qui peuvent être fort importantes. J'ai réduit ces variations au minimum en utilisant des lampes à filament de charbon gros et courts, au lieu de lampes à filament métallique qui, par ailleurs, auraient été préférables (leur spectre est presque identique à celui de l'acétylène).

Le filament de mes lampes est simplement replié en forme d'U; l'ampoule est cylindrique. La portion utilisée du flux a pour axe une perpendiculaire au plan du filament; un repère marqué sur la douille permet de placer la lampe dans la position choisie. La différence de potentiel aux bornes de la lampe est de 10 volts. La capacité de la batterie d'accumulateurs, de 60 ampères-heure, est suffisante pour que je n'aie pas eu à la recharger dans le cours des expé-

(1) J'avais déjà fait en 1909 une série de mesures avec des lampes claires.

riences faites à Laissac, à l'Aigoual et au Pic. Au reste, dans chacune de ces localités, la lampe n'a pas fonctionné plus de 2 heures.

J'ai employé comme pile étalon un Daniell que je préparais 15 minutes avant l'expérience à l'aide d'une solution saturée de sulfate de cuivre pur, et d'une solution de sulfate de zinc pur saturée à 15° et diluée au double. A Paris, à Laissac et au Pic, le zinc avait été amalgamé avec soin avant de former l'étalon; mais à l'Aigoual cette précaution n'ayant pu être prise, la force électromotrice de l'étalon n'a peut-être pas été exactement la même que dans les autres stations.

Le galvanomètre était un galvanomètre à cadre mobile transportable de Chauvin et Arnoux, convenablement shunté.

Les résistances étaient en constantan (1).

La lampe électrique qui m'a servi d'étalon est numérotée 24; j'ai aussi employé, pour vérifier la lampe 24, une autre lampe numérotée 5.

La pression intérieure de la bouteille d'acétylène dissous qui me servait de générateur a été à peu près la même dans les quatre séries d'expériences : 8^{kg} à 10^{kg}, la pression de la bouteille pleine étant de 13^{kg}. La composition du mélange acétylène-acétone était donc sensiblement la même. Sur le trajet du gaz j'avais placé, pour éliminer l'acétone, un tube de boulettes de charbon de bois imbibées de bisulfite de soude. Je me suis rendu compte par la suite que l'élimination obtenue n'était pas complète; cependant, comme la bouteille était presque pleine, l'influence de cette impureté sur les expériences n'a pas dû être sensible.

(1) Dans le transport de mon matériel au Pic du Midi, la résistance variable h avait été égarée. J'ai dû en improviser une autre avec les ressources de l'établissement. J'ai tendu deux fils de fer dans un tube de verre recourbé dont la partie coudée était pleine de mercure. En faisant pivoter ce tube autour d'un axe perpendiculaire à son plan, on déplaçait la colonne de mercure le long des deux fils et l'on pouvait ainsi faire varier leur longueur utile. Ce modèle de résistance variable aurait pu être très commode. Malheureusement l'emploi, que je n'ai pu éviter, de fil de fer n'a pas été très heureux. Il s'échauffait très notablement pendant que la lampe était en service; sa résistance variait ainsi progressivement; le mercure le mouillait mal et se répandait très irrégulièrement entre les fils et la paroi du tube qui en était très rapprochée; la résistance pouvait ainsi se modifier dans le cours d'une expérience. En fait, l'équilibre qui était établi avant l'expérience entre les deux forces électromotrices mises en opposition entre M et N n'existait plus, le plus souvent, à la fin. Les erreurs introduites ainsi ne suffisent pas d'ailleurs à expliquer les désaccords que j'ai obtenus dans mes expériences du Pic. J'ai noté, en effet, de combien il fallait modifier la résistance variable pour rétablir l'équilibre après les expériences, et j'ai déterminé, une fois à Paris, quelle influence ce changement de résistance pouvait avoir sur l'intensité lumineuse de la lampe; je n'ai trouvé qu'une variation de $\frac{1}{50}$.

Pic du Midi. — Les expériences définitives ont été faites en octobre 1912. J'étais installé dans la pièce supérieure de la maison construite par l'Université de Toulouse; j'en avais obturé toutes les ouvertures. Je n'ai d'ailleurs opéré que la nuit; il n'y avait donc dans la pièce aucune trace de lumière étrangère. Il soufflait au dehors une tourmente extrêmement violente; sur le toit sous lequel je me trouvais, le vent ne cessait de projeter de petits cailloux arrachés aux pentes de la montagne, et l'intérieur de la pièce, quoique beaucoup mieux isolé du vent que les locaux où j'avais opéré les années précédentes, était sillonné de courants d'air. Les flammes d'acétylène dans ma lampe Fouché, bien moins close que la lampe Féry, étaient soumises par moment à des oscillations assez sensibles.

Les étalons et le châssis photométrique étaient disposés sur deux tables écartées à une distance convenable. J'ai répété chaque expérience en plaçant le châssis dans deux positions différentes. Avec l'étalon Fouché, j'ai fait avec chaque bec trois couples d'expériences en employant chaque fois des débits différents.

J'ai employé les plaques Lumière bleues. Chaque plaque porte, sur les deux moitiés de la longueur des bandes intercalées, les impressions produites d'une part par l'étalon à acétylène, de l'autre par la lampe électrique. Les impressions des lampes à acétylène ont été faites d'abord successivement sur toutes les plaques, puis ensuite les impressions par la lampe électrique. Les échelles de teintes ont été imprimées à mon retour à Paris 1 mois plus tard, et les plaques développées 10 jours après. Je n'ai donc pas pris la précaution de croiser les expériences pour éliminer l'influence de l'instabilité de l'image latente; je ne m'étais pas encore rendu compte de l'importance de ce phénomène.

Aigoual. — Les expériences ont été faites à l'Observatoire, en septembre 1911. J'étais installé dans un bâtiment nouvellement construit pour servir de refuge aux touristes, et bien abrité du vent qui, comme au Pic, soufflait en tempête.

J'ai déjà indiqué une cause d'erreur de nos expériences de l'Aigoual, le mauvais état du Daniell. Dans l'espoir d'obtenir une sensibilité plus uniforme, j'avais employé pour ces expériences, comme pour celles faites à Laissac, les plaques sur glaces utilisées pour les clichés de la Carte du ciel. Mais, soit que les plaques aient été exceptionnellement mauvaises, soit plutôt que le développement fait par exception en cuvette verticale ait été defectueux, je n'ai jamais eu dans mes expériences de photométrie des noircissements aussi peu uniformes. Pour beaucoup de plaques le noircissement des bandes de l'échelle de teintes,

qui aurait dû croître de l'une à l'autre, reste constant, tandis que celui des bandes intercalées qui aurait dû rester constant décroît; il faut quelque attention pour ne pas confondre les deux séries de bandes. Ce défaut n'influe d'ailleurs pas beaucoup sur les résultats que donne l'application de la méthode de l'échelle de teintes; mais les graves dissemblances qui se manifestent ainsi entre la sensibilité des diverses plaques ont pu exister aussi dans leurs stabilités. Pressé par le temps, au lieu d'imprimer l'éclairement de la lampe électrique sur chaque plaque à côté de celui des diverses lampes à acétylène, je ne l'ai imprimé que sur une plaque supplémentaire. Chaque plaque porte donc une échelle de teinte imprimée à Paris 2 mois plus tôt, et les bandes intercalées imprimées à l'Aigoual sur toute leur longueur avec une des lampes étudiées, lampes à acétylène ou lampes électriques. La comparaison des lampes à acétylène à la lampe électrique suppose donc que les images latentes de l'échelle de teintes se sont modifiées de la même façon avec le temps sur les diverses plaques. Cette hypothèse est rendue moins plausible par les grandes inégalités que les plaques ont manifestées. L'importance de cette cause d'erreur est difficile à évaluer; on peut cependant estimer dans un cas particulier à combien a pu se monter la somme de l'erreur ainsi produite et de celle qui provient du mauvais état de la pile; en comparant, à l'aide des clichés de l'Aigoual, les lampes électriques n° 24 et n° 5.

Laissac. — J'étais installé, à Laissac, dans une cave de la maison de M. Bouty. L'installation, faite à loisir, ne laissait rien à désirer, mais le local offrait le défaut contraire aux précédents : il manquait un peu d'aération. J'en ouvrais toutes les issues et ventilais le mieux possible d'heure en heure; je ne crois pas que l'acide carbonique ait pu s'y accumuler au point d'influer sensiblement sur l'éclat de la flamme. Les expériences ont été faites 3 jours après celles de l'Aigoual; les plaques photographiques appartenaient au même lot, mais leurs défauts ont dû avoir moins d'influence, car l'éclairement de la lampe 24 se trouve imprimé sur chaque plaque à côté de celui de la lampe à acétylène. L'effet de l'instabilité de l'image latente de l'échelle de teintes a donc été suffisamment éliminé.

Paris. — Les observations ont été faites à Paris, en 1913; pour la lampe Fouché, la pression atmosphérique était de 767^{mm}, et, pour la lampe Féry, de 760^{mm}. L'impression de la lampe électrique se trouve sur le cliché même qui porte les impressions de la lampe à acétylène. Pour l'étalon Fouché, j'ai

étudié le bec simple et le bec à entraînement, en faisant avec chacun d'eux toute une série de poses sous des débits croissants.

Résultat des expériences. — Le Tableau XIX contient le résumé des expériences. J'en ai supprimé celles qui se rapportent au bec Féry qui n'ont pu être terminées. La signification des colonnes est la suivante :

- I. Numéro d'ordre de la plaque dans ce Tableau.
- II. Nom de l'étalon suivi de l'initial du bec : *e*, bec à entraînement; *s*, bec simple.
- III. Pression du gaz sur le bec en millimètres de xylol.
- IV. Lecture du manomètre différentiel de débit (déplacement de la colonne en millimètres).
- V. Numéro d'ordre de la bande fictive d'égal éclairément.
- VI. Logarithme du rapport des intensités du bec étudié et de l'étalon auxiliaire qui a servi pour l'impression de l'échelle de teintes.
- VII. Logarithme du rapport des intensités du bec étudié et de la lampe électrique 24.
- VIII. Valeur numérique du rapport précédent.

Sauf pour les expériences à l'Aigoual, les rapports des intensités des becs et de la lampe électrique 24 sont déduits des comparaisons des impressions faites sur chaque plaque par ces deux sources lumineuses. Pour les plaques de l'Aigoual, ces rapports sont déduits des comparaisons des impressions faites sur les diverses plaques par les lampes étudiées avec celle faite sur la plaque 26 par la lampe électrique 24. Cinq expériences faites à Paris indiquent, pour le rapport des intensités des lampes électriques 24 et 5, les nombres suivants :

$$0,735; 0,750; 0,730; 0,770; 0,750;$$

$$I_5 = 0,747 I_{24}.$$

Les discordances que présentent les nombres précédents montrent que mon étalon électrique n'était pas très constant. La comparaison des deux lampes, d'après les clichés 25 et 26, conduit cependant à un résultat encore plus discordant

$$I_5 = 0,836 I_{24}.$$

Peut-être l'instabilité de la plaque rend-elle la méthode de l'échelle de teintes très peu précise telle que je l'ai appliquée; peut-être aussi s'est-il produit dans les deux expériences 25 et 26 une erreur importante. Ne sachant

quelle est celle des deux expériences qui est en défaut, et ne pouvant en éliminer une *a priori*, je les ai fait entrer toutes les deux de la manière suivante dans la discussion :

D'après les expériences de Paris, on a

$$\log I_{24} = \log I_5 - \log 0,836.$$

D'après l'expérience 25 le rapport de l'intensité de la lampe 5 à celle de la lampe auxiliaire qui a servi pour imprimer les échelles de teintes de l'Aigoual, a pour logarithme 0,083. Le rapport de l'intensité de la lampe 24 à celle de la lampe auxiliaire aura donc pour logarithme

$$0,083 + 0,126 = 0,209.$$

On peut obtenir ainsi une deuxième série de valeurs des rapports des intensités des divers étalons à l'Aigoual à celle de la lampe électrique 24. On trouve :

TABLEAU XX.

Numéro de l'expérience...	17.	18.	20.	21.	22.	23.	24.
Log du rapport des intensités...	9,401	9,508	9,679	9,628	9,765	9,734	9,714
Valeur numérique.....	0,252	0,322	0,178	0,425	0,582	0,542	0,518

Les échelles de teintes ont été imprimées sur les plaques de l'Aigoual dans une même séance; la lampe auxiliaire a eu ainsi la même intensité pour toutes les plaques. Les échelles de teintes qui ont servi dans les autres expériences ont été imprimées à des jours différents sans que je me sois astreint à donner à la lampe la même intensité; les écarts qui existent entre les différentes valeurs de l'intensité de la lampe électrique 24, en fonction de celle de la lampe auxiliaire, tiennent donc surtout aux variations de cette dernière lampe.

TABLEAU XIX.

Résultats des expériences pour l'étude de l'influence de la pression atmosphérique.

Pic du Midi.		Altitude = 2870 ^m .		Pression = 542 ^{mm} ,0.			
I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.
1.	{ Féry <i>e</i>	47	54,5	1,81	0,128	9,693	0,493
	{ Électrique 24			4,47	0,435		
2.	{ Féry <i>e</i>	47	54,5	4,73	0,129	9,685	0,484
	{ Électrique 24			4,36	0,444		

TABLEAU XIX (suite).

Résultats des expériences pour l'étude de l'influence de la pression atmosphérique.

Pic du Midi.		Altitude = 2870 ^m .		Pression = 542 ^{mm} , 0.			
I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.
3.	{ Féry s.	155	60,0	3,92	9,956	9,611	0,408
	{ Électrique 24.			5,64	0,345		
4.	{ Féry s.	155	60,0	6,50	9,993	9,662	0,459
	{ Électrique 24.			5,82	0,331		
5.	{ Fouché s.	179	53,2	3,50	9,950	9,582	0,382
	{ Électrique 24.			5,32	0,368		
6.	{ Fouché s.	179	53,0 (*)	6,31	9,981	9,594	0,393
	{ Électrique 24.			5,07	0,387		
7.	{ Fouché s.	160	47,8	4,20	9,892	9,526	0,336
	{ Électrique 24.			5,35	0,366		
8.	{ Fouché s.	160	47,8 (*)	6,83	9,940	9,566	0,368
	{ Électrique 24.			5,25	0,374		
9.	{ Fouché s.	140	42,5	4,50	9,868	9,513	0,326
	{ Électrique 24.			5,50	0,355		
10.	{ Fouché s.	140	42,5 (*)	7,32	9,901	9,487	0,307
	{ Électrique 24.			4,73			
11.	{ Fouché e.	65	51,7	1,91	0,079	9,672	0,470
	{ Électrique 24.			4,81	0,407		
12.	{ Fouché e.	65	51,7	4,63	0,110	9,687	0,486
	{ Électrique 24.			4,62	0,423		
13.	{ Fouché e.	45	46,8	2,12	0,062	9,636	0,433
	{ Électrique 24.			4,58	0,426		
14.	{ Fouché e.	45	46,8	4,95	0,084	9,643	0,440
	{ Électrique 24.			4,40	0,441		
15.	{ Fouché e.	38	41,8	2,77	0,010	9,592	0,391
	{ Électrique 24.			4,68	0,418		
16.	{ Fouché e.	38	41,8	5,47	0,044	9,589	0,388
	{ Électrique 24.			4,22	0,455		
Aigoual.		Altitude = 1567.		Pression = 635 ^{mm} , 7.			
17.	Féry e.	40	48,5	3,94	9,610	9,449	0,281
18.	Féry s.	129	48,0	2,60	9,717	9,556	0,360

(*) Ces nombres ont été obtenus en supposant une erreur de 10^{cm} sur la distance du châssis à la lampe. Cette erreur est probable parce que la différence des distances pour les expériences 5 et 6, 7 et 8, 9 et 10 est indiquée sur le cahier d'expérience de 10^{cm} plus faible que celle des expériences sur les lampes Féry et la lampe Fouché avec le bec à entraînement (1 et 2, 3 et 4, 11 et 12, 13 et 14, 15 et 16). Or, ces différences auraient dû être toutes constantes et égales à la longueur de la petite table sur laquelle je posais le châssis photométrique. J'ai adopté, comme distance pour les expériences 6, 8 et 10, les distances inscrites pour les expériences 12, 14 et 16.

TABLEAU XIX (suite).

Résultats des expériences pour l'étude de l'influence de la pression atmosphérique.

Aigoual.		Altitud. = 1567 ^m .		Pression = 635 ^{mm} ,7.			
I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.
19.	Fouché <i>s</i>	123	44,0			non mesurable	
20.	Fouché <i>s</i>	110	39,0	2,30	9,888	9,727	0,533
21.	Fouché <i>s</i>	94	34,0	3,50	9,837	9,676	0,474
22.	Fouché <i>e</i>	50	54,0	4,35	9,964	9,803	0,635
23.	Fouché <i>e</i>	46	49,0	5,13	9,943	9,782	0,605
24.	Fouché <i>e</i>	40	44,0	4,88	9,923	0,762	0,578
25.	Électrique 5.....			4,25	0,083	9,922	0,836
26.	Électrique 24.....			3,84	0,161		
Laissac.		Altitude = 600 ^m .		Pression = 720 ^{mm} .			
27.	Féry <i>e</i>	29	35,7			non mesurable	
28.	{ Féry <i>s</i>	118	38,7	7,98	0,268	9,651	0,448
	{ Électrique 24.....			6,95	0,617		
29.	{ Fouché <i>s</i>	116	36,7	9,15	0,271	9,809	0,644
	{ Électrique 24.....			9,00	0,462		
30.	{ Fouché <i>s</i>	98	31,9	10,70	0,145	9,741	0,551
	{ Électrique 24.....			9,73	0,404		
31.	{ Fouché <i>s</i>	81	26,7	10,78	0,138	9,686	0,485
	{ Électrique 24.....			9,13	0,452		
32.	{ Fouché <i>e</i>	51	53,7	7,65	0,385	9,885	0,767
	{ Électrique 24.....			8,50	0,500		
33.	{ Fouché <i>e</i>	45	48,2	9,25	0,263	9,847	0,703
	{ Électrique 24.....			9,58	0,416		
34.	{ Fouché <i>e</i>	40	43,2	9,18	0,269	9,822	0,664
	{ Électrique 24.....			9,19	0,447		
Paris.		Altitude = 63 ^m .		Pression = 767 ^{mm} .			
	Électrique 24.....			3,40	0,152		
	Fouché <i>s</i>	37	18,5	4,09	9,761	9,609	0,406
	»	48	22,6	3,86	9,814	9,662	0,459
33.	»	57	26,6	4,57	9,872	9,720	0,525
	»	71	33,2	5,36	9,971	9,819	0,659
	»	83	37,9	5,65	0,030	9,878	0,755
	»	101	45,7	6,56	0,112	9,960	0,912
	Électrique 24.....			3,09	0,177		
	Fouché <i>e</i>	12	17,2	5,36	9,640	9,463	0,290
36.	»	14	20,3	5,50	9,720	9,543	0,349
	»	17	25,1	6,24	9,817	9,640	0,437
	»	24	33,3	7,43	9,892	9,715	0,519

TABLEAU XIX (suite).

Résultats des expériences pour l'étude de l'influence de la pression atmosphérique.

Paris.		Altitude = 63 ^m .		Pression = 767 ^{mm} .			
I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.
37.	Fouché <i>e</i>	25	32,8	6,43	9,888	9,710	0,513
	»	32	39,5	6,71	9,948	9,770	0,589
	»	36	44,3	6,25	9,982	9,804	0,637
	»	42	50,3	6,87	0,010	9,832	0,679
	»	47	57,5	7,30	0,056	9,878	0,755
	Électrique 24.....			3,07	0,178		
Paris.		Pression = 760 ^{mm} .					
38.	Électrique 24.....			4,38	0,177		
	Féry <i>s</i>	104	44,8	5,59	9,972	9,795	0,624
	» <i>s</i>			4,16	9,987	9,810	0,646
	» <i>e</i>	35	43,0	8,97	9,708	9,531	0,340
	» <i>e</i>			6,48	9,701	9,524	0,334
	Électrique 24.....			4,35	0,176		

Les expériences faites en double au Pic du Midi mettent en évidence une cause d'erreur importante de la méthode de l'échelle de teintes telle que je l'ai appliquée alors. Avec chaque bec et chaque débit, j'ai fait au Pic successivement deux expériences qui ne diffèrent que par la distance qui séparait la plaque photographique de la source. Ces deux expériences auraient dû indiquer la même valeur pour l'intensité du bec; or les écarts des résultats sont très notables.

Il m'était difficile de surveiller le réglage de l'étalon Féry qui, pour éviter toute fuite de lumière, était enveloppé de papier noir. Avant la première expérience je réalisais le mieux possible l'affleurement de la flamme au repère; mais cet affleurement pouvait cesser au cours de deux expériences. La flamme ne prend pas immédiatement son état de régime qui dépend de la température du bec et de l'appel d'air; de plus un dépôt léger de buée pouvait se déposer d'une expérience à l'autre sur les lentilles du condenseur, ou disparaître. Mais l'étalon Fouché est à l'abri de ces causes d'erreurs. Avant chacune des expériences d'un couple avec l'étalon Fouché, je lisais les deux manomètres, et leurs indications sont restées concordantes; dans ces conditions j'ai toujours eu à Paris une constance absolue pour l'étalon Fouché. Les écarts trouvés au Pic atteignent cependant presque le dixième. Ils sont trop forts pour qu'on puisse les attribuer aux lampes à acétylène.

Il est aussi bien difficile de les attribuer à la lampe électrique. En admettant que cet étalon n'ait pas eu, par quelque défaut de montage, la même intensité au Pic que dans les autres stations, comment expliquer que son intensité ait subi, pendant cette série d'expériences, des variations de $\frac{1}{10}$? Les défauts que j'ai signalés dans la résistance variable ne paraissent pas susceptibles d'introduire d'erreur supérieure au cinquantième.

Si les écarts observés ne proviennent pas des lampes, ils ne peuvent provenir que de la méthode. Les erreurs des temps de pose sont hors de cause; le temps de pose du Pic était de 30 secondes, l'erreur ne pouvait être que de 1 seconde, sensiblement de $\frac{1}{30}$.

Les écarts ont une allure systématique frappante. Pour le plus grand nombre des couples d'expériences, la première, qui correspond à la distance minima de la plaque à la lampe, conduit à une intensité plus faible que la seconde. Cette remarque permet d'expliquer les écarts par l'instabilité des images latentes.

L'éclairement produit par l'étalon électrique a été en effet, dans presque toutes les expériences, intermédiaire aux éclairagements de la lampe à acétylène dans les deux expériences des couples. Le noircissement qu'il a provoqué est ainsi intermédiaire entre les deux autres. On peut en juger colonne V par les numéros d'ordre des bandes fictives de l'échelle de teintes qui correspondent à ces noircissements. Le numéro d'ordre le plus faible est celui de la bande la plus intense. Or j'ai déduit le rapport des éclairagements des deux lampes des rapports des éclairagements qui auraient produit ces bandes fictives. Cette déduction ne serait légitime que si la gradation de la plaque avait été la même au moment des expériences au Pic, et au moment de l'impression des échelles de teintes et si, en admettant la constance de la gradation pour la plaque non impressionnée, les images latentes obtenues au Pic avaient conservé le même rapport jusqu'au jour du développement. L'impression de l'échelle de teintes a été faite 1 mois après les expériences du Pic. Supposons que pendant ce temps la gradation de la plaque ait augmenté, ou, ce qui est plus vraisemblable, que les impressions faites au Pic se soient effacées, que les rapports des noircissements latents se soient rapprochés de l'unité. Dans l'expérience 5 par exemple, les bandes fictives de l'échelle de teintes correspondant aux éclairagements de la lampe électrique et de la lampe à acétylène se rapprochent. L'éclairement produit par la lampe à acétylène, le plus intense, estimé par rapport à la lampe électrique sera jugé plus faible qu'il n'était. Dans l'expérience 6 au contraire où l'éclairement produit par la lampe à acétylène était plus faible que celui de la lampe électrique, il sera jugé trop fort.

D'après la première expérience d'un couple, l'intensité conclue pour la lampe étudiée est donc trop faible, et d'après la seconde trop forte. Il y a donc des chances pour que la moyenne des deux expériences soit notablement plus exacte que chacune d'elles. Cette explication a contre elle le fait que, pour certains couples d'expériences, l'ordre des intensités est inversé. Peut-être est-il permis de mettre ce fait sur le compte des anomalies que présentent si souvent les plaques photographiques.

L'erreur introduite par cette seconde forme d'instabilité de l'image latente, est sans doute d'autant plus grande que les intensités que l'on compare sont plus différentes. Elle a dû être très faible à Laissac où les numéros d'ordre des bandes fictives sont presque égaux; elle a dû être plus importante à l'Aigoual. Les écarts que présentent les numéros d'ordre des bandes fictives sur les clichés de ces deux stations correspondent à des éclairagements notablement moins différents qu'au Pic; les échelles de teintes avaient été impressionnées en effet avec des éclairagements dans le rapport 1,1 tandis que sur les clichés du Pic, elles l'ont été avec des éclairagements dans le rapport 1,2. Cette cause d'erreur est négligeable à Paris, où les échelles de teintes n'ont été imprimées que quelques jours avant l'expérience.

J'ai obtenu d'ailleurs, par une expérience directe sur ce défaut des plaques, un résultat inverse de celui de la discussion précédente. Une plaque Lumière étiquette bleue portait une échelle imprimée depuis 6 mois. En me servant de cette échelle, j'ai cherché à déterminer les rapports mutuels de trois éclairagements connus. Ces éclairagements, dont l'ordre de grandeurs croissantes est A, B, C, avaient pour rapports réels

$$\frac{C}{A} = 2,99, \quad \frac{B}{A} = 1,74.$$

Les valeurs trouvées à l'aide de l'échelle de teintes sont

$$\frac{C}{A} = 2,01, \quad \frac{B}{A} = 1,29.$$

L'expérience conduit donc à des rapports trop petits. Il faut admettre soit que la gradation de la plaque dans les régions non impressionnées a diminué, soit que la gradation de l'image latente de l'échelle a augmenté, résultats inverses des précédents.

J'espère pouvoir consacrer à ce phénomène une étude plus approfondie.

Étalon Féry. — Les résultats des expériences sur l'étalon Féry sont reportés dans le Tableau XXI.

TABLEAU XXI.

Bec à entraînement.						Bec simple.					
I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.
1.....	542,0	47	54,5	0,493	1,46	3.....	542,0	155	60,0	0,408	0,64
2.....	542,0	47	54,5	0,484	1,44	4.....	542,0	155	60,0	0,459	0,72
17.....	635,7	40	48,5	0,267	0,79	18.....	635,7	129	48,0	0,341	0,54
										0,375	0,59
27.....	720,0	33	38,7			28.....	720,0	108	38,7	0,448	0,70
38.....	760,0	35	43,0	0,340		38.....	760,0	104	44,8	0,624	
	760,0	35	43,0	0,334			760,0	104	44,8	0,646	
38.....	(moyenne des 2 exp.)			0,337	1,00	38.....	(moyenne).			0,635	1,00

Les colonnes ont les significations suivantes :

- I. Numéro d'ordre du cliché dans le Tableau XIX;
- II. Pression atmosphérique en millimètres de mercure;
- III. Pression de l'acétylène sur le bec en millimètres de xylol;
- IV. Débit (lectures du manomètre différentiel);
- V. Intensité du bec en fonction de la lampe électrique 24. Les intensités adoptées pour les expériences de l'Aigoual (17 et 18) sont les moyennes de celles indiquées dans les Tableaux XIX et XX;
- VI. Intensité du bec en fonction de son intensité à la pression 760^{mm}.

Sur le registre d'observation j'ai indiqué que la durée de pose dans l'expérience 18 a pu être en erreur de 1 seconde. Si cette erreur s'est produite, elle n'a pu être que par défaut, la pose aurait été de 9 secondes au lieu de 10. En admettant pour ces petites différences de durée de pose la validité de la loi de réciprocité, il faudrait multiplier l'intensité trouvée par 1,1 et l'on obtiendrait ainsi 0,375 au lieu de 0,341.

J'ai indiqué aussi que le débit n'avait pas cessé de croître avant les expériences 3 et 4 qui ont été faites l'une à la suite de l'autre. Il est possible que ce phénomène se soit encore produit une fois l'expérience commencée, et que pour l'expérience 4 le réglage du bec n'ait pas été le même que pour l'expérience 3; cela expliquerait la grande différence des deux résultats qui auraient dû être identiques.

La figure 25 résume ces résultats. Les abscisses représentent les intensités en fonction de l'intensité à la pression 760^{mm}, les ordonnées la pression atmosphérique en fonction de la pression atmosphérique normale 760^{mm}. On voit

qu'avec les deux becs l'intensité commence à diminuer avec la pression pour croître ensuite.

Ce phénomène peut s'expliquer par l'effet des changements dans la masse d'acétylène brûlée dans la flamme, dans la vitesse de sortie du gaz et dans la couleur de la flamme.

Les masses d'acétylène brûlées sont proportionnelles aux produits des débits en volumes par la pression. Je décrirai plus loin les expériences qui me permettent d'évaluer les débits en volumes d'après les lectures du petit manomètre Topley qui m'a servi dans ces expériences. En prenant comme unités de débit de pression du gaz sur le bec, et de pression atmosphérique, les nombres trouvés à Paris, on obtient le Tableau suivant :

TABLEAU XXII.

	Bec à entraînement.				Bec simple.			
	I.	II.	III.	IV.	I.	II.	III.	IV.
Pic.....	0,71	1,50	1,07	1,34	0,71	1,53	1,09	1,49
Aigoual...	0,81	1,24	1,03	1,14	0,83	1,18	0,98	1,24
Laissac....	0,95	0,96	0,91	0,94	0,95	0,93	0,88	1,04
Paris.....	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

- I. Pressions atmosphériques;
- II. Débits en volumes;
- III. Masses ($I \times II$);
- IV. Pression sur le bec.

La masse d'acétylène brûlée dans une flamme de longueur donnée diminue donc avec la pression, puis augmente. Il est probable que l'éclat intrinsèque de cette flamme varie dans le même sens que la masse d'acétylène brûlée, lorsque, comme dans nos expériences, la flamme n'est ni fuligineuse ni bleue. Il commencerait donc, pour cette cause, par diminuer pour augmenter ensuite. L'intensité de l'étalon ne dépend pas seulement de l'éclat intrinsèque de la flamme, mais aussi de l'aire utilisée. Or le diaphragme limite cette aire en hauteur et non en largeur. La largeur de la flamme doit dépendre de la vitesse de l'acétylène à la sortie; plus la vitesse est grande, plus la flamme devient effilée, et, inversement, plus la vitesse est faible, plus la flamme s'élargit. La vitesse du gaz, à la sortie par un même orifice, varie comme le débit en volume. La flamme commencerait par s'élargir pour s'amincir ensuite. Pour cette seconde cause l'intensité de l'étalon commencerait donc par augmenter pour diminuer ensuite.

La couleur de la flamme dépend de la proportion d'air et d'acétylène qui la forme. S'il y a excès de gaz, la flamme est fuligineuse et rougeâtre ; pour une proportion convenable de gaz et d'air, la flamme est le plus éclairante possible ; lorsque la quantité d'air augmente, tout le carbone se brûle aussitôt que l'acétylène est dissocié, et la flamme est bleue et très peu éclairante. Le volume de l'air entraîné dans la flamme est fonction du frottement des deux gaz, grossièrement proportionnel au carré de la vitesse de l'acétylène ; donc au carré du volume d'acétylène écoulé. La proportion d'air dans la flamme croîtrait donc plus vite que celle de l'acétylène ; la combustion deviendrait plus complète, la flamme plus bleue. Cette conclusion n'est pas valable pour des expériences faites dans une station donnée en accroissant le débit du bec. Lorsque le débit est trop grand, la flamme y devient fuligineuse. Mais la flamme s'allonge alors beaucoup ; la vitesse de l'acétylène diminue dans les parties élevées de la flamme ; l'appel d'air est beaucoup plus faible au sommet qu'à la base. Dans mes expériences, au contraire, la flamme a toujours eu la même longueur, les vitesses relatives de ses diverses régions ont dû rester les mêmes, tandis que les vitesses absolues variaient, suivant l'altitude, comme les nombres de la colonne II du Tableau XXII. A la pression normale, la couleur de la flamme du bec à entraînement dans mon étalon est d'ailleurs notablement plus rouge que celle du bec simple. C'est sensiblement le même volume d'acétylène qui est brûlé dans les deux becs (colonne IV, cliché 38, Tableau XIX), mais sa vitesse est beaucoup moindre dans le bec à entraînement dont l'orifice est plus large (colonne III, pression sur le bec) ; l'appel d'air est plus faible, la combustion est moins complète, la flamme est plus rouge. Le pouvoir actinique peut donc s'accroître davantage en passant de Paris au Pic pour le bec à entraînement que pour le bec simple. Dans ce dernier cas, en supposant que la flamme soit le plus éclairante possible aux environs de la pression atmosphérique normale, elle deviendrait plus bleue, moins lumineuse aux pressions faibles.

Ces remarques montrent combien sont complexes les effets de la pression atmosphérique sur l'étalon Féry. On pourrait sans doute tirer, des courbes que j'ai obtenues, les facteurs de correction de l'étalon dépendant de la pression ; mais ces facteurs ne s'appliqueraient qu'à des becs identiques à ceux dont je me suis servi. Adopterait-on l'un d'eux, il faudrait définir exactement la hauteur de la flamme et la position de son image sur le diaphragme. Il semble donc illusoire d'expliciter un Tableau de corrections qui ne s'appliqueraient qu'à une lampe très spéciale.

Les deux courbes que j'ai obtenues montrent d'ailleurs que ces corrections sont fort importantes dans les conditions où je me suis placé au voisinage de la pression normale.

L'intensité de l'étalon passe par un minimum et reste à peu près constante au voisinage de la pression 640. On pourrait sans doute trouver une ouverture du bec, une longueur de flamme et une position du diaphragme telles que ce minimum se produise au voisinage de la pression normale dans la station où l'on doit se servir de l'étalon. L'emploi de l'étalon Féry serait alors beaucoup plus pratique.

Étalon Fouché. — L'étalon Fouché se prête beaucoup plus facilement que les autres à une correction automatique des changements d'intensité produits par les conditions atmosphériques. Si ces conditions sont telles, par exemple, que l'intensité de l'étalon doive diminuer, il suffit d'augmenter le débit pour lui rendre son éclat. Je me suis proposé précisément, dans mes expériences, de déterminer quels sont les facteurs par lesquels il faut multiplier le débit en volume dans les diverses conditions atmosphériques pour que l'étalon conserve la même intensité que dans les conditions normales.

Les expériences fournissent pour chaque station, en fonction de la lampe électrique étalon, l'intensité de la lampe Fouché brûlant sous deux ou trois débits différents, les débits en volume étant mesurés à la pression atmosphérique régnant à la station correspondante. A Paris, les expériences ont été assez multipliées pour permettre de tracer la courbe des intensités lumineuses en fonction des débits. Cette courbe permet alors de déterminer quel est le débit qui donne, à Paris, la même intensité à l'étalon qu'un débit donné dans une autre station. Comme, dans chaque station, les intensités sont sensiblement proportionnelles aux débits, le rapport des deux nombres trouvés est le facteur par lequel il faut multiplier le débit adopté pour l'étalon sous la pression normale, pour obtenir le débit qui, à une autre pression, lui donnera la même intensité.

Étalon Fouché, bec simple. — Les données relatives à l'étalon Fouché, bec simple, sont reportées dans le Tableau XXIII où les premières colonnes ont les significations suivantes :

- I. Stations et pressions atmosphériques correspondantes;
- II. Numéro d'ordre de l'expérience dans le Tableau XIX;
- III. Intensité en fonction de la lampe électrique 24;
- IV. Lecture du manomètre différentiel de débit.

TABLEAU XXIII.

I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.
Pic du Midi $p_3 = 542^{\text{mm}}$ $= 0,71p$	5...	0,382	53,2	19,2	2,77	166,0	64,5	2,58
	6...	0,393	53,0	19,8	2,68	166,5	66,0	2,51
	7...	0,334	47,8	17,3	2,77	155,0	60,0	2,58
	8...	0,368	47,8	18,5	2,59	155,0	62,5	2,48
	9...	0,326	42,5	16,4	2,60	144,5	57,5	2,52
Aigoual $p_3 = 636^{\text{mm}}$ $= 0,83p$	10...	0,307	42,5	15,4	2,76	144,5	55,5	2,60
	20...	0,505	39,0	25,4	1,54	119,0	79,0	1,50
	21...	0,450	34,0	22,6	1,50	98,5	73,0	1,45
Laissac $p_1 = 720^{\text{mm}}$ $= 0,94p$	29...	0,644	36,7	32,4	1,13	102,5	93,5	1,10
	30...	0,551	31,9	27,7	1,15	94,0	83,0	1,13
	31...	0,485	26,7	24,4	1,10	83,0	76,5	1,09
Paris $p = 767^{\text{mm}}$ $= 1p$	35...	0,406	18,5					
	35...	0,459	22,6					
	35...	0,525	26,6					
	35...	0,659	33,2					
	35...	0,755	37,9					
	35...	0,912	45,7					

Pour discuter ces observations d'après le plan que j'ai indiqué plus haut, il faut d'abord construire la courbe qui représente les intensités I de l'étalon à Paris en fonction des lectures l du manomètre différentiel. Cette courbe est tracée (*fig. 26*) avec les portions de courbes obtenues dans les autres stations; les ordonnées sont les nombres de la colonne III du Tableau XXIII, les abscisses sont ceux de la colonne IV.

Les observations de Paris, sauf pour les débits les plus faibles, sont bien représentées par la droite

$$(A) \quad l = 50,3I.$$

On trouve en effet (') :

Intensités vraies	0,406	0,459	0,525	0,659	0,755	0,912
Intensités calculées.....	0,368	0,450	0,529	0,661	0,754	0,909
Observation-calcul.....	+0,038	+0,009	-0,004	-0,002	+0,001	+0,003

(') Nous avons déjà trouvé que l'intensité du bec simple était une fonction linéaire du débit

$$(B) \quad I = a + bD.$$

Dans la formule (A) il n'y a pas de terme constant. La différence entre les deux formules provient de ce que les observations qui les ont données n'ont pas été faites avec le même manomètre. Le manomètre qui a servi pour (B) fournit des indications proportionnelles aux volumes. Il n'en est pas de même pour le petit manomètre qui a servi pour (A), dont les indications sont proportionnelles à une puissance du volume intermédiaire entre 1 et 2.

En supposant qu'elle continue à être valable pour les débits faibles, la formule (A) permet de calculer quels seraient les débits qui, à Paris, donneraient à l'étalon des intensités de mêmes valeurs que celles observées dans les différentes stations. Les lectures correspondantes du manomètre différentiel sont indiquées dans la colonne V du Tableau XXIII. Les rapports des lectures observées (IV) et des lectures calculées (V) sont les facteurs cherchés; ils sont inscrits colonne VI. Ces conclusions sont évidemment permises pour les observations faites à Laissac et à l'Aigoual, où les intensités observées sont comprises parmi celles pour lesquelles la formule (A) s'applique aux erreurs d'expérience près. On peut l'étendre aux observations faites au Pic du Midi, en remarquant que, pour que les facteurs à déterminer soient valables, il suffit que les intensités du bec croissent proportionnellement aux lectures dans la station envisagée. Les intensités observées au Pic correspondraient à Paris à une flamme tout à fait petite pour laquelle la proportionnalité de l'intensité au débit n'est pas vérifiée; mais au Pic c'est une flamme normale qui obéit sensiblement à cette loi. Les valeurs moyennes des expériences faites aux mêmes débits, les lectures correspondantes du manomètre, et les rapports des deux nombres sont :

Intensités.....	0,387	0,352	0,316
Débits.....	53,1	47,8	42,5
Rapports.....	0,00730	0,00737	0,0744

Les écarts que présentent ces rapports, quoique d'une allure systématique, sont bien plus faibles que les erreurs d'expérience.

Les nombres des colonnes IV, V et VI se rapportent en réalité aux lectures du manomètre différentiel qui m'a servi dans ces expériences. Les nombres de la colonne VI ne seraient les facteurs cherchés que si les indications du manomètre étaient proportionnelles aux volumes, c'est-à-dire si la loi de l'écoulement de l'acétylène dans le manomètre était celle de l'écoulement des gaz dans les tubes capillaires. Or les expériences que je rapporte plus loin montrent que le capillaire du manomètre est trop court pour que cette loi soit vérifiée. La loi de l'écoulement est intermédiaire entre celle de l'écoulement à travers les tubes capillaires, et celle de l'écoulement à travers une ouverture en mince paroi. J'ai pu tracer par expérience les courbes représentant, pour les pressions des quatre stations, les volumes de gaz écoulés en fonction des lectures du manomètre ⁽¹⁾ (*fig. 27*). De ces courbes j'ai déduit, à un facteur constant

(1) Voir Tableau XXVIII, p. 91.

près, les volumes correspondant aux nombres des colonnes IV et V; ce sont les nombres des colonnes VII et VIII. Les nombres de la colonne VII, déduits de ceux de la colonne IV, ont été obtenus à l'aide des courbes correspondant respectivement aux pressions 542^{mm} , 636^{mm} et 520^{mm} ; les nombres de la colonne VIII, tirés de ceux de la colonne V ont été obtenus à l'aide de la courbe correspondant à la pression 767^{mm} . Les facteurs correspondant aux débits en volumes sont alors indiqués dans la colonne IX. En prenant la moyenne des nombres correspondant à chaque pression on obtient :

Pressions unité $p = 767^{\text{mm}}$.	Facteurs.
1	1
0,94	1,11
0,83	1,48
0,71	2,55

Pour dresser la Table des facteurs de débit avec la pression, j'ai tracé la courbe 28 où les pressions sont portées en ordonnées et les facteurs de débit en abscisses. Une première Table tirée de cette courbe a donné les valeurs des facteurs de débit en prenant comme pression normale celle de mes expériences à Paris, 767^{mm} . J'en ai tiré par interpolation la valeur 0,991 du facteur correspondant à la pression 760^{mm} . Divisant alors tous les nombres de la Table par ce nombre, j'ai obtenu la Table XXIV dans laquelle la colonne I contient les pressions en fonction de la pression 767^{mm} , la colonne II les facteurs de débit se rapportant à la pression normale 760^{mm} , la colonne III les différences tabulaires.

Pour faciliter le calcul des facteurs correspondant à des pressions données, j'ai enfin dressé la Table XXV qui donne en millimètres de mercure les valeurs des pressions correspondant aux valeurs successives des facteurs. La précision dans les déterminations que j'ai faites des quatre facteurs, d'après lesquels j'ai construit la courbe 28, n'atteint manifestement pas le centième; il m'a donc paru suffisant de dresser cette Table pour tous les facteurs différant d'une unité du second ordre décimal. Les facteurs sont valables pour les pressions intermédiaires entre celles qui les précèdent sur les Tableaux, incluses, et celles qui les suivent, exclues. Ainsi le facteur 1,03 convient pour les pressions $743^{\text{mm}}, 3$ à $747^{\text{mm}}, 8$.

Si l'on adoptait, par exemple, comme débit normal 3^l à l'heure à la pression 760^{mm} , il faudrait à la pression 745^{mm} un débit de $3 \times 1,03 = 3,09$ pour que l'étalon ait la même intensité.

EN PHOTOMÉTRIE PHOTOGRAPHIQUE.

TABLEAU XXIV.

I.	II.	III.	I.	II.	III.	I.	II.	III.
1,00	0,987		0,90	1,193		0,80	1,601	
0,99	1,001	14	0,89	1,224	31	0,79	1,657	56
0,98	1,017	16	0,88	1,255	31	0,78	1,720	63
0,97	1,033	16	0,87	1,288	33	0,77	1,790	70
0,96	1,051	18	0,86	1,325	37	0,76	1,868	78
0,95	1,070	19	0,85	1,365	40	0,75	1,957	89
0,94	1,091	21	0,84	1,408	43	0,74	2,065	108
0,93	1,114	23	0,83	1,454	46	0,73	2,196	131
0,92	1,138	24	0,82	1,502	48	0,72	2,349	153
0,91	1,165	27	0,81	1,550	48	0,71	2,517	168
0,90	1,193	28	0,80	1,601	51			

TABLEAU XXV.

Facteur de débit (bec simple).

767,3		709,8		672,8		645,0	
762,2	0,99	706,7	1,13	670,4	1,27	643,3	1,41
757,5	1,00	703,6	1,14	668,1	1,28	641,6	1,42
752,6	1,01	700,9	1,15	665,0	1,29	640,1	1,43
747,8	1,02	698,2	1,16	663,9	1,30	638,2	1,44
743,2	1,03	695,4	1,17	661,8	1,31	636,4	1,45
738,9	1,04	692,6	1,18	659,8	1,32	634,8	1,46
734,7	1,05	690,0	1,19	657,9	1,33	633,3	1,47
730,7	1,06	687,5	1,20	655,9	1,34	631,7	1,48
726,8	1,07	685,0	1,21	653,9	1,35	630,0	1,49
724,8	1,08	682,5	1,22	652,1	1,36	628,5	1,50
721,3	1,09	680,0	1,23	650,4	1,37	626,9	1,51
716,3	1,10	678,0	1,24	648,5	1,38	625,3	1,52
713,0	1,11	675,1	1,25	646,7	1,39	623,7	1,53
709,8	1,12	672,8	1,26	645,0	1,40	622,0	1,54
							1,55

Étalon Fouché, bec à entraînement. — Les données relatives à cet étalon sont inscrites dans le Tableau XXVI, où les colonnes ont les mêmes significations que dans le Tableau XXIII. La marche suivie pour la réduction est la même que pour l'*étalon Fouché, bec simple*. Les expériences de Paris indiquent la relation entre les lectures du manomètre et l'intensité (*fig. 29*); cette relation est loin d'avoir la régularité de celle relative au *bec simple* qui était une droite passant par l'origine; elle a cependant, sur une assez grande longueur, une forme linéaire

$$(C) \quad l = 95,2 \text{ I} - 16,2.$$

Les nombres de la colonne V, relatifs aux observations de Paris, représentent

les débits calculés avec cette formule. Les écarts entre l'observation et le calcul sont :

+5,9 +3,3 -0,3 +0,1 +0,2 -0,4 -0,1 +1,9 +1,8

Sauf les deux premières et les deux dernières, les lectures sont ainsi assez exactement représentées. Je me suis servi de la formule (C) pour calculer les lectures du manomètre donnant à la flamme, à Paris, une intensité égale à celles observées dans les différentes stations (colonne V). La colonne VI donne les facteurs cherchés, se rapportant aux lectures du manomètre; les colonnes VII et VIII sont les transformations en volume des nombres de IV et V, transformations faites comme pour le bec simple. La colonne IX contient les facteurs de pression pour des débits exprimés en volume. En prenant la moyenne des nombres correspondant à chaque pression on obtient :

Pression.	Facteur.
1	1
0,94	0,99
0,83	1,33
0,71	1,97

La courbe 30 représente ces nombres; on voit que, pour conserver à la flamme une intensité constante quand la pression diminue, il faut d'abord diminuer le débit, puis l'augmenter. Cette anomalie ne résulte pas de l'application illégitime de la formule (C) aux observations faites à Laissac. Les intensités observées à Laissac correspondent bien, à Paris, à une région de la courbe 29 qui ne peut pas se représenter par la droite (C); mais les écarts qui existent entre les débits observés et calculés d'après cette formule montrent qu'il faudrait augmenter, pour Laissac, les nombres de la colonne V, par conséquent diminuer les facteurs de débits correspondants. Au reste, on voit d'après les courbes 29 que, pour un même débit, l'intensité du bec est plus grande à Laissac qu'à Paris.

TABLEAU XXVI.

I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.
Pic du Midi...	11...	0,470	51,7	28,5	1,82	162,5	85,0	1,91
	12...	0,486	51,7	30,1	1,72	162,5	89,0	1,82
	13...	0,433	46,8	25,0	1,87	153,0	78,0	1,98
	14...	0,440	46,8	25,7	1,82	153,0	79,0	1,95
	15...	0,391	41,8	21,0	1,99	143,5	69,0	2,08
	16...	0,388	41,8	20,7	2,02	143,5	68,2	2,10

TABLEAU XXVI (suite).

I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.
Aigoual.....	{ 22...	0,608	54,0	41,7	1,30	150,0	110,5	1,36
	{ 23...	0,573	49,0	38,3	1,28	139,5	104,0	1,34
	{ 24...	0,548	44,0	36,0	1,23	129,0	100,0	1,29
Laissac.....	{ 32...	0,767	53,7	56,8	0,95	134,0	134,0	1,00
	{ 33...	0,703	48,2	50,7	0,95	124,0	125,0	0,99
	{ 34...	0,664	43,2	47,0	0,92	115,0	119,0	0,97
Paris.....	{ 36...	0,290	17,2	11,3		59,5		
	{ 36...	0,349	20,3	17,0		67,5		
	{ 36...	0,437	25,1	25,4		78,0		
	{ 36...	0,519	33,3	33,2		95,0		
Paris.....	{ 37...	0,513	32,8	32,6		94,0		
	{ 37...	0,589	39,5	39,9		106,5		
	{ 37...	0,637	44,3	44,4		114,5		
	{ 37...	0,679	50,3	48,4		125,0		
	{ 37...	0,755	57,5	55,7		136,0		

En résumé, mes observations montrent que, lorsque la pression atmosphérique diminue, il faut, pour conserver la même intensité à une flamme d'acétylène issue d'un bec simple, augmenter constamment le débit en volume; avec un bec à entraînement, il faut d'abord le diminuer, puis l'augmenter. Il est bien clair que le débit en volume n'est pas une caractéristique physique immédiate de la flamme. C'est le débit en masse qui importe, l'intensité de la flamme dépendant de la masse d'acétylène brûlée et de la proportion d'air et d'acétylène contenue dans la flamme. Or, les règles formulées pour les débits en volume existent aussi pour les débits en masse. Les facteurs par lesquels il faut multiplier les débits en volumes pour maintenir constants les débits en masses sont, en effet :

Paris.	Laissac.	Aigoual.	Pic.
1	1,06	1,21	1,41

Les facteurs trouvés pour maintenir l'intensité constante sont :

	Paris.	Laissac.	Aigoual.	Pic.
Bec simple.....	1	1,11	1,48	2,55
Bec à entraînement.....	1	0,99	1,33	1,97

L'intensité n'est donc pas simplement proportionnelle à la masse d'acétylène brûlée; le mélange d'air et d'acétylène dans la flamme ne se fait pas dans la même proportion aux diverses pressions atmosphériques.

La proportion du mélange des deux gaz dépend de la forme du jet d'acétylène et de leur frottement mutuel, donc d'une certaine fonction de la vitesse de l'acétylène à la sortie du bec. Les phénomènes relatifs au bec simple peuvent s'expliquer en supposant que, quand la pression diminue, la forme du jet se modifie en augmentant la proportion d'air, et que la proportion d'air dans la flamme croît plus vite que la vitesse de l'acétylène. Pour conserver la même masse d'acétylène dans la flamme quand la pression atmosphérique diminue, on doit augmenter le volume du gaz débité par le bec, augmenter ainsi la vitesse de l'acétylène à la sortie, donc augmenter la proportion d'air contenue dans la flamme; la flamme devient plus bleue.

Nous avons vu qu'à Paris l'éclat intrinsèque d'une région donnée de la flamme d'un bec simple est constant, indépendant du débit. On peut supposer qu'il en est de même dans les autres stations. Mais d'une station à une autre plus élevée, la couleur de la flamme vire au bleu.

Admettons que la flamme du bec simple soit le plus éclairante possible à la pression normale; elle deviendrait de plus en plus bleue aux pressions basses; son éclat intrinsèque diminuerait; pour lui conserver la même intensité totale, il faudrait augmenter sa surface, donc augmenter le débit. Comme la flamme devient de plus en plus bleue, les facteurs de débit doivent croître de plus en plus quand la pression atmosphérique diminue, et l'on peut concevoir que, pour des pressions assez basses, la flamme ne serait plus éclairante du tout. C'est là, sans doute, ce qui explique que la courbe représentant les facteurs de débit en fonction de la pression paraisse si nettement avoir une asymptote.

Pour expliquer les résultats trouvés avec le bec à entraînement, il faut supposer qu'à la pression normale la proportion d'acétylène est trop forte, la flamme est rougeâtre et n'est pas le plus éclairante possible. Quand la pression baisse elle devient plus blanche, plus éclairante; il faut, pour lui conserver la même intensité totale, diminuer sa surface, diminuer le débit. Pour une pression déterminée, son éclat intrinsèque deviendrait le plus grand possible, le facteur de débit serait minimum, puis l'éclat intrinsèque diminuant, les facteurs de débit augmenteraient, comme pour le bec simple.

Cette théorie suppose que la couleur de la flamme change notablement avec la pression atmosphérique. C'est un défaut grave pour un étalon; mais on arriverait certainement au même résultat avec les autres étalons à flamme si l'on poussait leur étude à des pressions aussi basses que je l'ai fait pour l'acétylène.

Au reste, il y aurait un moyen avec l'étalon Fouché de remédier à ce défaut : ce serait de définir, pour chaque pression, non pas simplement le débit qui

donne au bec l'intensité normale, mais le diamètre de l'orifice du bec qui donne pour le même débit en masse la même intensité. Si le débit en masse reste constant ainsi que l'intensité totale de la flamme, l'éclat intrinsèque de la flamme et sa couleur ne peuvent pas changer beaucoup. Pour conserver la même proportion d'air dans la flamme, il faut, si la théorie que j'ai esquissée est bonne, diminuer la vitesse de l'écoulement de l'acétylène, donc augmenter le diamètre de l'orifice. La mesure du diamètre de l'orifice est difficile à faire avec précision, mais on peut la remplacer, comme M. Fouché l'a conseillé, par la mesure de la pression sur le bec. Le bec métallique que j'ai décrit permet à l'expérimentateur de modifier comme il le désire le diamètre de l'ouverture. Il serait inutile d'adopter un bec pour chaque pression possible; il suffirait de le changer lorsque la pression changerait trop.

Il serait à souhaiter que l'étude de l'influence de la pression atmosphérique sur l'étalon Fouché fût entreprise sur cette nouvelle base et poursuivie pour les radiations visibles comme pour les radiations photographiques.

Influence de l'humidité de l'air. — L'humidité de l'air est un des agents qui influent le plus sur les étalons lumineux ordinaires. D'après Liebenthal, une variation d'un litre dans la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air, par mètre cube, produirait une variation de 0,55 pour 100 dans l'intensité de la lampe à l'acétate d'amyle, et une variation de 0,6 pour 100 dans l'intensité de la lampe au pentane. D'un moment à un autre de l'année, les variations de ces étalons peuvent atteindre, de ce fait, 8 pour 100; dans le cours d'un mois, les oscillations atteignent souvent 5 pour 100.

Les études de Liebenthal ont été faites en comparant chaque jour ses deux lampes à une lampe électrique et en notant, au moment de l'observation, l'état hygrométrique de l'air. Cette manière d'opérer avait l'avantage de laisser les flammes dans les conditions mêmes de leur emploi; mais elle avait l'inconvénient d'exiger des comparaisons très nombreuses à une lampe électrique dont il fallait par ailleurs vérifier la constance. Il m'a semblé préférable, avec la lampe à acétylène, de faire varier artificiellement la composition de l'atmosphère comburant, et de faire les comparaisons nécessaires les unes immédiatement après les autres.

L'air comburant était soit de l'air sec, soit de l'air humide. J'ai comparé les intensités de la flamme brûlant dans ces deux atmosphères par la méthode photographique de l'échelle de teintes. Je fixais la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air humide en saturant cet air de vapeur d'eau à une température déterminée.

Je me suis servi pour ces expériences de la lampe décrite page 5. Cette lampe, dont la fenêtre était close hermétiquement par une glace, n'avait d'autre ouverture que celles nécessaires à l'arrivée d'air et au dégagement des produits de la combustion. Trois tubes de 10^{mm} de diamètre amènent l'air comburant en débouchant dans un jeu de chicanes terminé par une ouverture en forme de couronne circulaire concentrique au bec; la flamme en jet était ainsi enveloppée de tous côtés par la colonne d'air ascendant. Ces trois tubes sont soudés à une extrémité d'un tube métallique dont l'autre extrémité, terminée par une branche en Y, peut être mise en communication par deux robinets, soit avec la canalisation d'air sec, soit avec celle d'air humide (*fig. 31*).

La canalisation d'air sec comprend deux flacons laveurs à barbotage, à acide sulfurique, trois éprouvettes à ponce sulfurique, une éprouvette à chlorure de calcium, et un tube témoin d'anhydride phosphorique de 30^{cm} de long.

La canalisation d'air humide comprenait, dans une première série d'expériences, un serpentin en porcelaine poreuse de 1^m de long et de 1^{cm} de diamètre intérieur, et un tube en U plein de ponce humide. Le serpentin et le tube de ponce étaient plongés dans un thermostat plein d'eau; l'air qui les traversait se saturait de vapeur d'eau à la température du thermostat. Le tube de ponce humide était ajouté moins pour parfaire la saturation de l'air que pour arrêter les gouttelettes d'eau qui pouvaient être entraînées. J'ai craint par la suite que le passage dans le tube de porcelaine poreuse soit insuffisant pour saturer l'air. Dans la série d'expériences sur lesquelles sont basés les résultats que je rapporte ici, l'air se sature de vapeur d'eau dans un grand ballon contenant de l'eau en ébullition. L'air entre dans le ballon par barbotage et en sort par un tube placé au-dessus du niveau de l'eau. A la sortie du ballon, il circule dans un serpentin formé d'un tube de plomb de 10^m de long et de 5^{mm} de diamètre intérieur placé dans le thermostat. L'air sort du serpentin saturé de vapeur d'eau à la température du thermostat. Un petit récipient à la base du serpentin reçoit l'eau de condensation. Le serpentin est relié par un tube de caoutchouc très court (10^{cm}) à une des branches de la fourche du tube métallique fixé à la lampe. Pour éviter que l'air, à la sortie du thermostat, ne se refroidisse, et que la vapeur d'eau ne se condense, une rampe à gaz chauffe le tube métallique depuis la fourche jusqu'à la lampe; toutes les causes qui auraient pu produire une détente de l'air entre le serpentin et la lampe ont été supprimées; en particulier le robinet R', nécessaire pour isoler la canalisation pendant l'expérience faite avec l'air sec est une pince qui comprime alors le tube de caoutchouc, mais qui, pour l'écoulement de l'air saturé de vapeur d'eau, lui laisse toute sa section.

L'air était fourni par une soufflerie d'orgue, la même qui avait servi à Foucault pour l'entretien de son miroir tournant dans la mesure de la vitesse de la lumière. Le débit est très constant lorsqu'il se fait par l'intermédiaire d'un détendeur; malheureusement, la chute de pression dans le serpentin ou dans les flacons laveurs était trop considérable pour que je pusse me servir de ce détendeur, et je n'ai pas pu assurer la constance de l'écoulement avec une précision supérieure au $\frac{1}{30}$. Les robinets R_1 et R_2 règlent le débit de l'air dans les deux canalisations, les robinets R'_1 et R'_2 les isolent l'une ou l'autre de la lampe. Un manomètre différentiel à la sortie de la soufflerie permet de fixer avant l'expérience photométrique les ouvertures des robinets R_1 et R_2 pour que les débits de l'air dans les deux canalisations soient les mêmes. La combustion de la flamme est donc toujours ainsi alimentée, au $\frac{1}{30}$ près, par la même quantité d'air; seule, sa composition diffère.

Le récipient du thermostat a une contenance de 20^l. Avant l'expérience, je le remplissais d'eau à la température choisie.

L'expérience photométrique était faite sur une plaque Jouglà bande bleue portant une échelle de teinte latente impressionnée trois jours plus tôt. Les bandes intercalées étaient impressionnées sur différentes parties de leur longueur par les divers éclaircissements produits par la flamme entretenue avec de l'air sec ou humide. Le fourneau à gaz maintenant l'eau du ballon en ébullition et la rampe à gaz étaient éteints immédiatement avant la pose; la température du thermostat était alors notée, ainsi que les lectures des manomètres placés sur le circuit de l'acétylène.

TABLEAU XXVII.
Influence de l'humidité de l'air.

I.	II.	III.	IV.	V.	I.	II.	III.	IV.	V.
1a.....	Sec	0	1,03		4a.....	Sec	0	1,02	
b.....	Humide	16	0,92	18,4	b.....	Humide	32,5	0,67	50,3
c.....	»	32	0,715	49,5	c.....	»	30,0	0,61	43,4
d.....	Sec		0,98		d.....	»	27,0	0,66	36,2
e.....	Humide	44	0,575	99,0	e.....	»	44,5	0,52	100,1
f.....	Sec		0,99		f.....	»	40,5	0,56	80,2
					g.....	Sec		0,98	
2a.....	Humide	8	1,11	10,8	5a.....	Humide	10,3	0,87	10,2
b.....	Sec		1,05		b.....	Sec		1,03	
c.....	Humide	22	0,830	26,8	c.....	Humide	12,8	0,81	14,7
d.....	»	34	0,580	54,9	d.....	»	14,5	0,81	16,4
e.....	»	47	0,490	11,8	e.....	»	24,0	0,81	30,1
f.....	Sec		0,925		f.....	Salle		0,89	16,1
					g.....	Sec		0,97	
3a.....	Salle		1,02	13,4					
b.....	Sec		0,99						
c.....	Humide	17,2	0,945	19,6					
d.....	Sec		1,01						
e.....	Humide	24,3	0,855	30,7					
f.....	»	36,5	0,725	63,8					

Les résultats des expériences sont indiqués dans le Tableau XXVII (p. 83) :

- I. Numéro d'ordre de l'expérience;
- II. Nature de l'air comburant, sec ou humide;
- III. Température de saturation de l'air humide;
- IV. Intensité lumineuse observée;
- V. Volume de vapeur d'eau en litres par mètre cube d'air.

Dans les expériences 3*a* et 5*f* l'air comburant a été l'air de la salle introduit dans la lampe par la soufflerie, sans passer par le serpentin; la tension de la vapeur d'eau a été déduite de l'observation du psychromètre.

Les intensités lumineuses sont exprimées dans chaque série d'expériences en prenant pour unité la moyenne des intensités lumineuses obtenues dans cette série pour la flamme alimentée avec de l'air sec.

Le volume de la vapeur d'eau en litres par mètre cube d'air a été déduit de la tension de vapeur p à l'aide de la formule

$$V = 1000 \frac{p}{P - p},$$

où P est la pression atmosphérique au moment de l'expérience, 758^{mm}.

Les valeurs des intensités lumineuses sont reportées sur la figure 32, où les points représentatifs des expériences de chaque série sont marqués d'un signe particulier.

Les expériences sont loin d'être précises. La cause en est sans doute dans la difficulté de maintenir constants et égaux les débits des deux canalisations d'air. Les inégalités des débits n'ont cependant pas dû dépasser le $\frac{1}{30}$ et les écarts des intensités observées sont en écart de plus du $\frac{1}{10}$ (*voir* en particulier les expériences avec l'air sec 2*b* et 2*f* et l'expérience 2*a*). L'intensité lumineuse de la flamme est donc extrêmement sensible aux variations du volume d'air comburant. Les erreurs ayant cette origine ne peuvent avoir eu qu'un caractère accidentel.

L'évaluation de la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air peut avoir, au contraire, introduit des erreurs systématiques. Cette évaluation reposait sur la mesure de la température à laquelle l'air était saturé de vapeur d'eau. J'ai admis que cette température était celle du thermostat. Les erreurs sur la mesure de la température du thermostat ne peuvent pas avoir dépassé un demi-degré, ce qui, dans le cas le plus défavorable des températures basses, n'a pas introduit dans la valeur de la tension de vapeur une erreur plus grande que le $\frac{1}{30}$. Mais

il n'est pas sûr que la température de l'air dans le serpentin ait été celle du thermostat. Avant de pénétrer dans le serpentin, l'air avait barboté dans de l'eau presque à l'ébullition; il était donc à une température très supérieure à celle du thermostat. Peut-être peut-on craindre qu'il ne soit pas refroidi dans le serpentin jusqu'à cette température. L'évaluation de la température de saturation aurait été ainsi systématiquement trop basse, celle de la quantité de vapeur d'eau trop faible. L'influence de l'humidité de l'air sur l'intensité lumineuse de l'étalon aurait été jugée trop forte. Mais le tube du serpentin était assez long et assez étroit pour que cette erreur systématique ait été faible. L'erreur prédominante est l'erreur accidentelle provenant des inégalités de débits de l'air.

Si l'on admet que les erreurs des expériences sont surtout accidentelles, il est légitime de chercher à représenter les résultats par une formule. J'ai adopté la formule

$$I = 1 - 0,007 V + 0,00002 V^2,$$

qui est celle de la courbe tracée sur la figure au milieu des points représentatifs des expériences.

Les formules qui représentent l'influence de l'humidité de l'air sur l'étalon Hefner et sur l'étalon au pentane sont rapportées à l'intensité lumineuse de flammes brûlant dans une atmosphère dont la teneur en vapeur d'eau est respectivement de 8^l, 8 et de 8^l par mètre cube d'air. En adoptant une convention analogue, la formule relative à l'acétylène devient, avec une approximation suffisante,

$$\frac{I_v}{I_8} = 1 - 0,007 (V - 8) + 0,00002 (V - 8)^2,$$

où I_v et I_8 représentent les intensités de la flamme pour des teneurs en vapeur d'eau de V litres et de 8^l par mètre cube d'air.

Soit I_8 l'intensité normale de l'étalon, celle qu'il possède avec le débit adopté D_8 , pour une teneur en vapeur d'eau de 8^l. Avec ce débit D_8 l'intensité de l'étalon devient I_v lorsque la teneur de l'atmosphère en vapeur d'eau est de V litres. On peut se proposer de rendre à la flamme son intensité normale en modifiant le débit du bec. Déterminons la nouvelle valeur D'_8 du débit.

Nous avons vu [p. 53, formule (C)] que l'intensité de la flamme fournie par un bec simple est à une pression atmosphérique donnée une fonction linéaire du débit

$$I = -0,389 + 0,278 D,$$

l'unité d'intensité étant l'intensité d'une flamme brûlant 5^l d'acétylène à

l'heure, les débits étant exprimés en litres. Inversement, le débit qui donne à la flamme une intensité I est

$$D = 3,60I + 1,40.$$

Le débit qui donne à la flamme dans les conditions hygrométriques normales l'intensité I_v est

$$D_v = 3,60I_v + 1,40 = [3,60 - 0,0252(V - 8) + 0,0007(V - 8)^2]I_s + 1,40.$$

L'influence de l'état hygrométrique de l'air est trop faible pour changer la nature de la relation entre les débits et les intensités, et l'on peut admettre que, dans les diverses conditions expérimentales, on modifiera toujours les intensités dans le même rapport quand on modifiera les débits dans un rapport donné. Le rapport du débit cherché D'_s au débit D_s doit donc être le même que celui de D_s à D_v . Pour obtenir dans les conditions hygrométriques de l'expérience l'intensité I_s , il faudra donc multiplier le débit D_s par $\frac{D_s}{D_v}$, D_v étant donné par la formule précédente.

Réglage de l'étalon Fouché. — Il conviendrait de prendre, comme débit normal du bec, celui qui donne à la flamme une intensité de 5 bougies décimales. Je n'ai pu faire jusqu'à présent cette détermination. Convenons provisoirement de définir l'intensité de l'étalon Fouché comme étant celle d'une flamme d'acétylène fournie par un bec débitant 5^l à l'heure, la pression atmosphérique étant de 760^{mm} de mercure, et la teneur de l'atmosphère en vapeur d'eau de 8^l par mètre cube d'air (¹). Le débit D_s est alors égal à 5^l, l'intensité I_s à 1^l.

Pour régler l'étalon au moment d'une expérience photométrique, on mesurera la teneur de l'atmosphère en vapeur d'eau V et la pression atmosphérique H .

Le débit D'_s correspondant à l'état hygrométrique de l'expérience et à la pression atmosphérique normale est

$$D'_s = 5 \frac{5}{5 - 0,025(V - 8) + 0,0007(V - 8)^2}.$$

(¹) D'après M. Fouché, un bec débitant 6^l,2 à l'heure aurait une intensité de 0,44 carcel. Le débit de 5^l fournirait alors, d'après la formule C, une intensité de 0,33 carcel. L'intensité de 1 carcel serait fourni par un débit de 12^l à l'heure; la flamme est alors beaucoup trop longue pour être d'un emploi commode; elle est un peu fuligineuse. Les expériences de M. Fouché ont été faites par les méthodes visuelles; l'actinisme du bec de 5^l pour des plaques au gélatino-bromure non orthochromatisées serait très notablement supérieure à 0,33 carcel, la flamme de l'acétylène étant beaucoup plus blanche que celle du carcel.

Le Tableau XXV (p. 77) donne le facteur p par lequel il faut multiplier D'_8 pour obtenir le débit correspondant à la pression atmosphérique observée.

Le débit pD'_8 ainsi calculé donnera à la flamme, dans les conditions atmosphériques de l'expérience, la même intensité que le débit 5^1 dans les conditions atmosphériques normales.

ÉTUDE DU MANOMÈTRE DIFFÉRENTIEL INDICATEUR DE DÉBIT.
COEFFICIENT DE VISCOSITÉ DE L'ACÉTYLÈNE.

La caractéristique de l'étalon Fouché est le réglage du débit de l'acétylène. Si l'on désire simplement s'assurer de la constance de l'étalon, sans chercher à donner à son intensité lumineuse une valeur déterminée, il suffit d'insérer entre deux points de la canalisation un manomètre différentiel et de maintenir constantes les indications de ce manomètre. Mais si l'on veut pouvoir donner à la flamme une intensité fixée d'avance, indépendamment du manomètre employé, il faut avoir étalonné le manomètre en unités de débit, par exemple en litres par heure.

Si la portion de la canalisation comprise entre les deux extrémités du manomètre différentiel peut être assimilée à un tube capillaire très long, la relation entre la masse de gaz écoulée et les pressions p_0 et p_1 de part et d'autre du capillaire est

$$(A) \quad p_0^2 - p_1^2 = \frac{p_1}{D_1} \left[\eta \frac{16l}{\pi r^4 \left(1 + \frac{4\varepsilon}{r} \right)} \mathfrak{Q}_m + \frac{2}{\pi^2 r^2} \mathfrak{Q}_m^2 \right],$$

où

$\mathfrak{Q}_m$ est la masse de gaz écoulée dans l'unité de temps;

D_1 , la masse de l'unité de volume du gaz à la pression p_1 et à la température de l'expérience;

η , le coefficient de viscosité du gaz;

ε , l'épaisseur de glissement;

l et r , la longueur et le rayon du tube.

Dans le problème actuel, où les débits sont très faibles, on pourra, si le tube capillaire n'a pas un diamètre extrêmement faible, réduire la formule (A) à

$$(B) \quad p_0 - p_1 = \eta \frac{8l}{\pi r^4} V,$$

V étant le volume de gaz écoulé dans l'unité de temps, à la pression et à la température de l'expérience.

C'est V que l'on a besoin de connaître pour régler l'étalon Fouché. On voit que si l'on connaissait η , coefficient de viscosité de l'acétylène, il suffirait de déterminer les dimensions l et r du tube pour déduire V de la différence de pression $p_0 - p_1$. Je me suis proposé d'obtenir une valeur de ce coefficient suffisamment précise pour cet usage.

Avec les manomètres dont je disposais, il m'était difficile d'expliciter avec précision en unités C. G. S. la différence de pression $p_0 - p_1$ et les dimensions l et r du capillaire. J'ai évité ces mesures en cherchant directement, non pas le coefficient de viscosité de l'acétylène, mais le rapport de ce coefficient à celui, bien connu, de l'air. Il suffit pour cela de mesurer les volumes V_1 et V_2 de gaz et d'air écoulés dans l'unité de temps par le capillaire, sous la même différence de pression $p_0 - p_1$. Si η_1 et η_2 sont les coefficients de viscosité du gaz et de l'air, on a alors, d'après (B),

$$(C) \quad \eta_1 V_1 = \eta_2 V_2.$$

On n'a donc pas besoin de connaître la valeur de $p_0 - p_1$; il suffit de régler les écoulements dans les deux expériences pour que les indications du manomètre soient les mêmes.

J'ai utilisé pour ces expériences mon grand manomètre. Pour être sûr que la formule (B) soit applicable, j'ai choisi comme capillaire un tube de 10^m de long et de 2^{mm} de diamètre. L'écoulement des gaz a toujours été très lent, inférieur à 5^{cm} par seconde; le terme de force vive, $\frac{2Q_m^2}{\pi^2 r^2}$ de la formule (A), est alors complètement négligeable vis-à-vis du premier.

L'acétylène, fourni par la bouteille, traversait le capillaire du manomètre, puis un robinet rhéostat, et s'écoulait dans un vase de Mariotte plein d'eau. Le volume V_1 de l'acétylène est égal à celui de l'eau qui se déversait du vase dans l'unité de temps, à condition que le gaz ne se soit pas dissous dans l'eau. Or le coefficient de solubilité de l'acétylène dans l'eau est assez grand, 1,2 à 15°. J'ai cherché à tourner la difficulté en saturant préalablement d'acétylène l'eau du vase de Mariotte.

Le vase de Mariotte était formé avec une éprouvette à dessécher les gaz d'une hauteur de 50^{cm} et d'un diamètre de 7^{cm}; sa contenance était d'environ 1^l,5. Cette masse d'eau, saturée d'acétylène à la température de l'expérience, 17°, aurait contenu moins de 2^l de gaz. J'en ai fait barboter plus de 60^l. Le bouchon de l'éprouvette était percé de deux tubulures : l'une, plongeant

jusqu'au fond du vase, servait à l'arrivée de l'acétylène; l'autre, très courte, servait à évacuer le gaz; elle était munie d'un bec pour le brûler et d'un robinet pour isoler de l'atmosphère l'intérieur du vase lorsqu'on se servait de l'éprouvette comme vase de Mariotte.

La grande hauteur de liquide que devaient parcourir les bulles d'acétylène avant de s'échapper et le faible diamètre de l'éprouvette laissaient espérer que la saturation de l'eau aurait été complète.

Le déversoir de l'eau de l'éprouvette était placé dans le même plan horizontal que l'ouverture du tube d'arrivée du gaz. L'acétylène fourni sous pression, par la bouteille d'acétylène dissous, s'écoulait ainsi dans le vase de Mariotte à peu près comme il l'aurait fait dans l'atmosphère. Il s'échappait par bulles successives, mais la formation de ces bulles ne provoquait pas de discontinuité sensible dans l'écoulement du gaz; les indications du manomètre étaient parfaitement stables.

Je n'ai pu pour ces expériences disposer de la soufflerie de Foucault, ni d'une source d'air sous pression; j'ai provoqué l'écoulement de l'air dans le manomètre en l'aspirant au lieu de le pousser. J'avais d'abord provoqué l'aspiration par l'écoulement de l'eau d'un vase de Mariotte dans lequel débouchait la canalisation. Mais, quel que soit le diamètre de l'ouverture de cette canalisation, l'arrivée de l'air se faisait toujours par saccades; les bulles n'étaient pas régulièrement espacées; un train de bulles pressées l'une contre l'autre était suivi d'un repos. Des ébranlements se faisaient sentir tout le long de la canalisation; la mesure de la différence de pression $p_0 - p_1$ n'avait aucune précision. J'ai donc renoncé à l'emploi d'un vase de Mariotte et j'ai aspiré l'air par l'écoulement de l'eau d'un vase ordinaire. Le vase qui m'a servi est une très grande jarre de 30^{cm} de diamètre et de 50^{cm} de hauteur; l'eau s'écoule par une tubulure inférieure, l'air arrive par le goulot au-dessus du niveau de l'eau. L'inconvénient de ce dispositif, c'est que la différence de pression qui provoque l'écoulement de l'air diminue pendant que le niveau de l'eau s'abaisse. Mais le diamètre de la jarre était assez grand pour que la variation de cette différence de pression n'ait pas atteint $\frac{1}{100}$ dans le cours d'une expérience; elle était très régulière, et j'ai adopté comme valeur de la différence de pression $p_0 - p_1$ la moyenne des lectures du manomètre faites au commencement et à la fin d'une expérience.

J'ai mesuré l'eau écoulée en la recevant dans des fioles jaugées de 100^{cm³} ou de 500^{cm³}. Je comptais le nombre de secondes rondes nécessaires pour que le niveau de l'eau dans la fiole s'élevât au-dessus du repère; je mesurais ensuite, avec une pipette, l'excès d'eau.

B.

L'erreur commise sur la mesure du temps est très faible. La fiole était fixée sur une petite planchette à bascule; par le jeu de la bascule, son ouverture se plaçait sous le jet ou se retirait. Un observateur comptait mentalement la seconde en écoutant un parleur à secondes et agissait sur la bascule aux moments voulus. Avant d'appuyer sur la planchette, il balançait son doigt au-dessus d'elle pendant quelques secondes, à la cadence du parleur; il donnait simplement une amplitude un peu plus grande à ce mouvement, aux époques où il fallait déplacer la fiole. Les erreurs personnelles que l'on peut commettre ainsi sur la mesure du temps sont les mêmes dans les deux sens; elles ont le même signe et s'éliminent. Elles ne peuvent d'ailleurs pas dépasser quelques centièmes de seconde.

Pendant qu'un observateur surveillait l'écoulement de l'eau, un autre lisait le manomètre. Les erreurs commises sur cette lecture sont plus grandes que celles commises sur la mesure du temps. On ne peut guère, avec mon manomètre, fixer la position de la colonne liquide avec une précision plus grande que le demi-millimètre, et la chute de pression le long du capillaire ne déplaçait pas la bulle de plus de 230^{mm}.

Le Tableau XXVIII contient le résultat des expériences. La première série d'expériences a été faite avec une fiole de 100^{cm³}, la deuxième avec une fiole de 500^{cm³}.

Les colonnes ont les significations suivantes :

- I. Volumes d'eau écoulés;
- II. Durées de l'écoulement;
- III. Lectures du manomètre différentiel;
- IV. Lectures normales;
- V. Corrections à apporter aux volumes mesurés, pour obtenir les volumes qui se seraient écoulés pendant les temps t (II) sous les différences de pression normales (IV);
- VI. Volumes corrigés;
- VII. Volumes écoulés dans l'unité de temps;
- VIII. Rapport des volumes d'air aux volumes de gaz écoulés sous la même différence de pression. Ce sont les valeurs données par chaque expérience pour le *rapport des coefficients de viscosité*.

TABLEAU XXVIII.

Écoulement de l'acétylène.								Écoulement de l'air.							
I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.
cm ³	sec	mm	mm	cm ³	cm ³	cm ³		cm ³	sec	mm	mm	cm ³	cm ³	cm ³	
100,5	138	33,4	31	-7,2	93,3	0,676	0,556	100,2	266	31	31		100,2	0,377	
100,2	125	35,0	35		100,2	0,801	0,523	100,1	241	34,7	35	+ 0,9	101,0	0,419	
100,2	85	56,0	56		100,2	1,180	0,562	100,6	152	55,9	56	+ 0,2	100,8	0,663	
100,45	84	57,0	56	-1,9	98,7	1,175	0,565								
100,25	63	72,7	72	-1,0	99,3	1,580	0,546	100,1	118	70,8	72	+ 1,7	101,8	0,863	
100,3	33	145,0	145		100,3	3,04	0,562	100,5	60	142,2	145	+ 1,9	102,4	1,707	
105,0	22	224,0	224		105,0	4,78	0,521	100,3	41	219,5	224	+ 2,1	102,4	2,49	
501,8	111	217,0	221	+9,2	511,0	4,604		502,0	199	227,5	221	-14,5	487,5	2,448	0,532
								501,2	204	220,5	221	+ 1,1	502,3	2,465	0,536
503,1	185	133,7	134	+1,1	504,2	2,725		502,2	317	139,3	134	-19,2	483,0	1,523	0,558
								501,0	328	135,0	134	- 3,7	497,3	1,515	0,555

Les résultats individuels des expériences présentent des écarts notablement plus forts que ceux qu'on aurait attendus d'après la précision des mesures. L'hypothèse fondamentale sur laquelle est basée la méthode, que le volume d'eau écoulé est exactement égal au volume d'acétylène ou d'air qui sortait de la canalisation, n'a donc pas été vérifiée.

La valeur moyenne des résultats de la première série d'expériences est

$$0,549.$$

Celle des résultats de la seconde série est

$$0,545.$$

Nous adopterons, comme valeur du rapport du coefficient de viscosité de l'acétylène à celui de l'air à la température de 17°, le nombre

$$0,547.$$

Le coefficient de viscosité de l'air à zéro degré C. est

$$0,0001733 \text{ (}^1\text{)}.$$

On trouve, par l'application de la formule de Sutherland, qu'il a pour valeur à 17°

$$0,0001818.$$

Le coefficient de viscosité de l'acétylène à 17° serait donc

$$\eta = 0,000094 \text{ C. G. S.}$$

(¹) *Recueil des constantes physiques*, publié par la Société française de Physique.

Étalonnage du manomètre différentiel. — La connaissance de la valeur de η permet de calculer par la formule (B), à l'aide de la différence de pression lue au manomètre différentiel de l'étalon Fouché, le volume d'acétylène écoulé, à condition que l'on connaisse les dimensions l et r du capillaire inséré entre les branches du manomètre. Malheureusement, la mesure du rayon du tube r offre de grandes difficultés et réclame une extrême précision.

Il est donc plus simple de graduer le manomètre directement en volume, en opérant comme je l'ai fait pour la mesure de η . On pourra éviter pour cette graduation l'emploi de l'acétylène et faire plus simplement la mesure avec l'air, en appliquant la formule (C); le volume d'acétylène qui se serait écoulé par le tube capillaire, sous une différence de pression donnée, est égal au volume de l'air écoulé sous cette même pression et qu'on mesure, divisé par le rapport des coefficients de viscosités

$$0,547.$$

Pour que cette façon d'opérer soit légitime, il faut que les dimensions du tube capillaire soient telles que la formule (B) soit applicable. Si le diamètre du tube est de $0^{\text{mm}},75$, sa longueur doit être au moins de 300^{mm} . J'ai déterminé cette limite inférieure à l'aide des expériences suivantes :

J'ai placé en série, dans la même canalisation, deux manomètres différentiels. Entre les deux branches du premier était inséré un tube de 10^{m} de long et de 2^{mm} de diamètre intérieur dans lequel l'écoulement obéit à la loi (B). Entre les branches du second était inséré le tube capillaire à essayer.

Les deux tubes étant en série, c'est le même volume de gaz qui les traverse. Si la relation (B) est applicable aux deux tubes, c'est une droite qui relie les points représentatifs des lectures simultanées aux deux appareils sur un graphique où l'on porte en abscisses les lectures p à l'un des manomètres, et en ordonnées les lectures q à l'autre. Cette droite a pour équation

$$(D) \quad p \frac{r^4}{l} = q \frac{r'^4}{l'}.$$

Les branches inclinées de mes deux manomètres avaient des courbures trop fortes pour que leurs indications soient des fonctions linéaires de la différence de pression. Le test précédent ne pouvait s'appliquer sans transformer ces indications. Mais on peut trouver un autre test en remarquant que, dans la relation (D), le coefficient de viscosité du gaz n'intervient pas. La courbe représentant les indications des deux manomètres doit être indépendante du gaz employé si la relation (B) est valable pour les deux tubes. C'est sous cette forme que j'ai fait l'expérience, avec de l'acétylène et de l'air.

Dans les Tableaux ci-dessous, le manomètre I (manom. I) est le manomètre type, muni du tube long et large; le manomètre II (manom. II) est celui où s'adaptent les capillaires à étudier. Naturellement, les indications de ce manomètre varient avec les dimensions du capillaire; j'ai multiplié ses indications par un facteur variable d'une expérience à l'autre, mais constant pour les deux gaz, de façon que les échelles de lectures soient sensiblement les mêmes pour les diverses expériences. Tous les capillaires étudiés avaient environ $0^{\text{mm}},75$ de diamètre.

Capillaire de 95^{cm} de longueur.

Acétylène.		Air.	
Manom. I.	Manom. II.	Manom. I.	Manom. II.
mm	mm	mm	mm
89,2	94,6	90,0	97,7
80,8	85,9	79,8	86,2
76,5	79,2	75,3	81,5
66,0	68,2	64,5	69,7
54,0	56,7	53,5	57,3
46,0	47,7	45,0	48,3
37,7	39,7	35,5	40,4
29,0	30,5	27,2	29,7
19,0	19,9	17,3	19,6

Les indications du manomètre II ont été divisées par 5.

Capillaire de 30^{cm} de longueur.

Acétylène.		Air.	
Manom. I.	Manom. II.	Manom. I.	Manom. II.
mm	mm	mm	mm
91,3	75,5	82,2	65,8
66,7	54,8	65,0	53,0
48,6	40,4	45,0	36,8
34,3	28,6	28,5	24,0
25,7	21,5	17,0	14,0
16,3	13,6		

Les indications de I ont été divisées par 2, celles de II par 4.

Capillaire de 20^{cm} de longueur.

Acétylène.		Air.	
Manom. I.	Manom. II.	Manom. I.	Manom. II.
mm	mm	mm	mm
79,1	85,8	77,2	77,0
52,1	53,0	52,1	50,3
31,8	32,1	34,6	34,1

Les indications des deux manomètres ont été divisées par 2.

Capillaire de 1^{cm},5 de longueur.

Acétylène.		Air.	
Manom. I.	Petit manomètre (1). mm	Manom. I.	Petit manomètre. mm
89,2	51,1	90,0	36,5
80,8	45,1	79,8	31,5
76,5	42,7	75,3	29,6
66,0	34,8	64,5	24,3
54,0	26,6	53,5	19,4
46,0	21,3	45,0	16,2
37,7	16,6	35,5	12,8
29,0	11,8	27,2	9,8
19,0	7,4	17,3	6,3

On voit (*fig. 33*) d'après ces expériences que, pour aucun des capillaires essayés, la loi de l'écoulement des gaz n'est la même que dans le tube du manomètre I. La divergence est surtout sensible pour les tubes plus courts que 20^{cm}. Pour les tubes qui, avec un diamètre de 0^{mm},75, ont une longueur supérieure à 300^{mm}, les deux courbes relatives à l'air et à l'acétylène sont pratiquement parallèles; on pourra étalonner le manomètre avec l'air, et transformer en volume d'acétylène les indications trouvées en volume d'air, en les multipliant par le rapport du coefficient de viscosité de l'air à celui de l'acétylène, l'inverse du nombre 0,547, que nous avons déterminé plus haut :

$$1,828.$$

Le système de mesure des volumes, préconisé par M. Fouché, est à l'abri des incertitudes sur la valeur du rapport des coefficients de viscosité et sur la légitimité de l'application de la formule (B). Au lieu de déterminer les volumes écoulés par la mesure de la différence de pression de part et d'autre d'un tube capillaire, il les obtient par la mesure de la différence de pression de part et d'autre d'une ouverture en mince paroi. Les volumes d'acétylène et d'air qui s'écoulent sous la même différence de pression sont alors, avec une approximation suffisante pour notre objet, en raison inverse des racines carrées des densités des deux gaz. D'autre part, en admettant la légitimité de l'application de la règle de Torricelli à l'écoulement des gaz, le volume de gaz écoulé à travers

(1) Ce petit manomètre est celui qui m'a servi dans les expériences sur l'influence de la pression atmosphérique sur l'étalon à acétylène.

l'ouverture ne serait plus proportionnel à la différence de pression, comme dans le cas des tubes capillaires, mais à la racine carrée de cette différence de pression; l'erreur relative commise sur la mesure des volumes serait donc deux fois plus faible que celle commise sur la mesure des pressions.

L'emploi d'une ouverture en mince paroi serait donc théoriquement plus avantageux que celui d'un tube capillaire. Mais pratiquement il pourrait être dangereux. L'ouverture doit être très petite, le moindre grain de poussière suffirait à la modifier et à changer l'étalonnage du manomètre. Elle ne pourrait être percée que dans une feuille métallique sertie dans un tube de métal, et difficile à examiner. On peut, au contraire, vérifier constamment l'état de propriété d'un tube capillaire en verre.

Influence de la pression du gaz sur les indications du manomètre. — Le coefficient de viscosité d'un gaz est indépendant de sa pression : le volume de gaz qui s'écoule par un tube capillaire l'est aussi [formule (B)]. Nous pourrions donc utiliser à toutes pressions atmosphériques un manomètre étalonné à une pression déterminée. Mais cela suppose que le tube capillaire soit assez long pour que la formule (B) soit applicable. Le petit manomètre qui m'a servi dans l'étude de l'influence de la pression atmosphérique sur l'étalon à acétylène était muni d'un capillaire trop court. Il a donc fallu le graduer pour chacune des pressions atmosphériques auxquelles j'ai opéré.

J'ai pu faire cette graduation à Paris, à l'aide du dispositif expérimental suivant (*fig. 34*).

Le petit manomètre et le grand manomètre muni du tube de 10^m de long sont montés en série. J'ai admis que la formule (B) était applicable, à toute pression, à ce grand manomètre. L'acétylène fourni par la bouteille B traverse un robinet rhéostat R₁, le petit manomètre *m*, le grand manomètre M et un long tube capillaire T; il est ensuite aspiré par une trompe à eau. Un robinet rhéostat R₂, placé entre le capillaire T et la trompe, fait communiquer la canalisation avec l'atmosphère de la salle. Un manomètre à air libre P indique la valeur de la pression de l'acétylène à la sortie de M. Lorsque la trompe fonctionne, elle aspire l'acétylène par R₁, et l'air atmosphérique par R₂. Pour une ouverture donnée de R₁, le jeu de R₂ modifie surtout la valeur de la pression de l'acétylène dans la canalisation; pour une ouverture donnée de R₂, le jeu de R₁ modifie surtout le débit d'acétylène. Par une combinaison convenable des ouvertures de R₁ et de R₂, on peut régler le débit de l'acétylène et sa pression à avoir telle valeur choisie. Le tube capillaire T a pour rôle d'amortir, sur la canalisation, les à-coups de la trompe.

Les résultats des expériences sont indiqués dans le Tableau XXIX.

Les pressions de l'acétylène pendant les expériences sont indiquées en tête des séries de nombres. Les colonnes marquées **M** contiennent les lectures faites au grand manomètre, celles qui sont proportionnelles aux débits en volume; les colonnes marquées *m* contiennent les indications du petit manomètre, dont on cherche l'équivalent en débit en volume. Les nombres sont rangés par ordre de débit, mais les expériences n'ont pas été faites avec cette régularité.

Les mesures étaient rendues particulièrement difficiles par les à-coups continuels dans le régime de la trompe; l'amortissement produit par le tube T, quoique réel, n'était pas suffisant pour supprimer leur influence sur la pression de l'acétylène. Je faisais les lectures des deux manomètres dans les moments de calme, lorsque P marquait la pression voulue, mais il n'est pas sûr que dans toute l'étendue de la canalisation la pression ait été la même.

TABLEAU XXIX.

Pression 757 ^{mm} .		Pression 717 ^{mm} .		Pression 634 ^{mm} .		Pression 541 ^{mm} .	
M.	m.	M.	m.	M.	m.	M.	m.
107,3	39,0	130,5	51,0	143,5	51,0	200,0	71,5
106,0	33,5	111,0	41,5	131,5	45,2	185,2	65,6
90,5	30,5	96,8	32,5	122,0	39,5	183,7	62,6
74,0	23,5	84,0	27,5	117,0	40,1	180,0	63,5
58,0	17,0	68,0	19,0	113,3	35,6	179,9	60,1
45,5	12,5	41,5	10,5	108,3	31,5	164,2	50,4
33,0	8,3			106,0	32,3	163,2	50,6
30,2	5,1					161,7	52,1
16,0	3,8					158,0	53,1
						151,0	42,0
						145,0	48,3
						144,5	46,0
						137,9	41,1
						138,0	37,8
						131,5	40,5
						131,0	36,0
						123,0	32,5
						114,5	27,2
						110,7	28,0

Ce sont les résultats de ces expériences qui ont servi à obtenir les courbes de la figure 27. Les lectures du petit manomètre sont portées en ordonnées; les lectures du grand manomètre en abscisses. On voit qu'à mesure que la pression diminue, les indications du petit manomètre, relatives à un même débit en volume, diminuent aussi. L'effet serait encore plus marqué si le diaphragme du manomètre était une ouverture en mince paroi, et c'est peut-être là le plus grand inconvénient du dispositif de M. Fouché.



RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS.

MÉTHODE DE L'ÉCHELLE DE TEINTES. APPAREILS.

J'ai décrit quelques appareils qui permettent d'appliquer facilement la méthode de l'échelle de teintes, en particulier un châssis photométrique pour l'impression des divers éclaircissements à comparer, une lampe étalon munie d'un obturateur toujours armé, un opacimètre intégrateur. Cet opacimètre permet de mesurer des opacités de plaques photographiques très hétérogènes; les détails de sa construction laissent à l'observateur des moyens faciles de modifier ses constantes optiques, et il peut servir pour l'étude de plages de toutes dimensions de 0^{mm}, 1 à 10^{mm} de diamètre.

PHOTOMÉTRIE PHOTOGRAPHIQUE.

L'application de la plaque photographique à la photométrie exige qu'on élimine ses variations de sensibilité d'un point à un autre. Les soins les plus minutieux dans le traitement de la plaque, pendant la pose et les opérations du développement, laissent subsister des inégalités de sensibilité atteignant plusieurs dixièmes, entre des points situés à 2^{cm} ou 3^{cm} les uns des autres. Ces inégalités se traduisent non pas seulement par des changements dans l'opacité produite par un éclaircissement donné, mais aussi par des changements dans la gradation.

La méthode de l'échelle de teintes, où les plages à comparer sont imbriquées les unes dans les autres, permet de ne pas tenir compte de ces variations. La concordance des valeurs trouvées en divers points de la plaque, pour le rapport des intensités des sources ayant impressionné les bandes intercalées et l'échelle de teintes, atteint au moins le $\frac{1}{300}$, quelle que soit l'hétérogénéité de la plaque.

Cette précision du $\frac{1}{300}$ n'est malheureusement qu'illusoire. Les écarts entre des expériences indépendantes ont toujours été dans mes expériences au moins

du $\frac{1}{100}$; ils ont parfois atteint le $\frac{1}{10}$, sans qu'on puisse attribuer cette inégalité à la source lumineuse ou à quelques défauts d'expériences.

L'origine de ces écarts paraît résider dans l'instabilité de l'image latente. L'image latente, comme l'a découvert M. de la Baume-Pluvinel, subit des modifications rapides dans les heures qui suivent la pose. Pour certaines émulsions elle se renforce; pour d'autres elle s'efface. Les variations ainsi produites, dans l'espace d'une heure après la pose, correspondent à des variations d'éclairement de l'ordre du $\frac{1}{10}$. Ces variations se continuent tant que la plaque n'est pas développée, et paraissent très capricieuses; elles sont souvent différentes pour deux plaques de la même boîte, conservées l'une contre l'autre entre la pose et le développement.

Il semble que, même lorsque la sensibilité de la plaque est très hétérogène, l'image latente produite par un éclairage donné se modifie après la pose de la même manière sur toute la surface de la plaque. Je n'ai pas fait d'expériences pour rechercher s'il en est de même pour des images latentes produites par des éclairages différents; la réponse doit être négative si l'on admet que les discordances qu'ont présentées mes expériences sur l'étalon à acétylène n'ont pas d'autres causes que l'instabilité de l'image latente.

On peut espérer augmenter la précision de la méthode de l'échelle de teintes et atteindre ainsi une précision de l'ordre du $\frac{1}{300}$ en faisant simultanément les poses de l'échelle de teintes et des bandes intercalées.

La gradation de l'image latente paraît diminuer avec le temps; des échelles de teintes impressionnées sur la même plaque à plusieurs mois d'intervalle ont des gradations différentes; l'échelle imprimée la seconde a une gradation plus forte.

ÉTALON A ACÉTYLÈNE.

J'ai étudié particulièrement l'étalon à acétylène Fouché dont la flamme brûle sous un débit constant.

Dans la limite de précision de mes expériences, c'est-à-dire à $\frac{1}{100}$ près, l'intensité lumineuse I d'un bec à jet est une fonction linéaire du débit D

$$I = a(D - D_0).$$

Pour les débits supérieurs à un certain débit D_0 , la flamme s'allonge tout en conservant le même éclat intrinsèque.

Les intensités des flammes fournies par divers becs pour les mêmes débits, dépendent plus de la forme du bec que du diamètre de l'orifice.

L'intensité paraît croître dans le même sens que l'épaisseur de la toile; des becs de même marque où cette épaisseur était la même, avaient la même intensité lumineuse, quoique les diamètres des orifices fussent très différents. Par contre, des becs d'autres marques donnaient des intensités légèrement différentes.

Si l'on se contente d'une précision de $\frac{1}{50}$, on peut choisir des becs quelconques, pourvu que l'orifice ne soit pas en mince paroi.

La bouteille d'acétylène dissous, qui est un générateur extrêmement commode, introduit dans l'acétylène de l'acétone. La proportion de cette impureté augmente à mesure que la bouteille se vide; le pouvoir éclairant diminue. Le barbotage du gaz dans le bisulfite de soude suffit pour lui rendre un pouvoir éclairant constant, à condition que la couche de bisulfite ait plus de 5^{cm} d'épaisseur. La présence de bisulfite entraîné ne paraît pas avoir d'action sur la flamme.

Des expériences faites à des altitudes diverses ont permis d'étudier l'influence de la pression atmosphérique sur l'étalon Féry et sur l'étalon Fouché. L'intensité lumineuse de l'étalon Féry, où la hauteur de la flamme est maintenue constante, commence par diminuer avec la pression pour croître ensuite. L'intensité lumineuse de l'étalon Fouché muni d'un bec simple, pour lequel le débit en volume est maintenu constant, diminue avec la pression. L'intensité de l'étalon Fouché diminue aussi avec la pression quand le débit en masse est maintenu constant. Les observations faites avec un bec simple (Bullier, 5¹) ont permis de dresser une Table des facteurs par lesquels il faut multiplier ces débits en volumes, pour obtenir, sous toutes pressions, la même intensité lumineuse qu'avec un débit donné sous la pression normale. Pour des pressions trop faibles, la correction de débit est impossible, la flamme cesse d'être éclairante.

L'influence de l'état hygrométrique de l'air sur l'étalon Fouché a été étudiée par des expériences de laboratoire où l'on a fait varier artificiellement la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air.

On peut maintenant calculer quel est le débit sous lequel doit brûler une flamme pour qu'elle ait la même intensité dans les conditions atmosphériques de l'expérience que dans les conditions normales.

Le réglage de l'étalon Fouché se fait le plus simplement, comme l'a indiqué son inventeur, à l'aide d'un manomètre différentiel intercalé dans la canalisation. Mais il y a quelques inconvénients à insérer, entre les branches de ce manomètre, une ouverture à mince paroi. L'orifice, forcément très petit, peut s'encrasser, et surtout la graduation en volume du manomètre n'est valable

que pour une valeur déterminée de la pression atmosphérique. Un tube capillaire très long (au moins 300^{mm}) et d'un assez grand diamètre (0^{mm}, 75) est à l'abri de ces objections; ses indications sont toujours proportionnelles aux débits en volumes. La graduation du manomètre muni de ce capillaire peut se faire avec l'air, comme l'a indiqué M. Fouché, à condition de multiplier les indications trouvées par le rapport du coefficient de viscosité de l'air à celui de l'acétylène.

J'ai pu déterminer une valeur de ce rapport, et par suite la valeur du coefficient de viscosité de l'acétylène.

Vu et approuvé :

Paris, le 2 juillet 1914,

LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES,

PAUL APPELL.

Vu et permis d'imprimer :

Paris, le 2 juillet 1914,

LE VICE-RECTEUR DE L'ACADÉMIE DE PARIS,

L. LIARD.

Fig. 1 a.

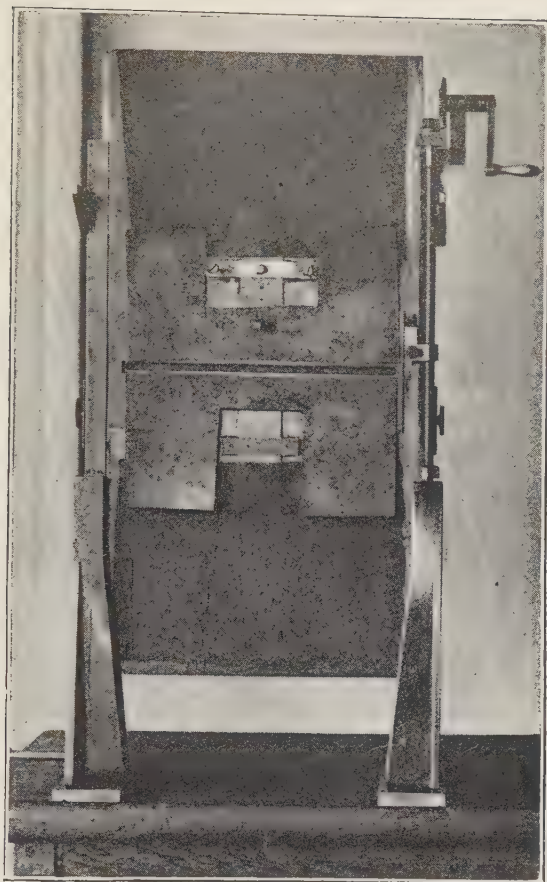


Fig. 1 b.

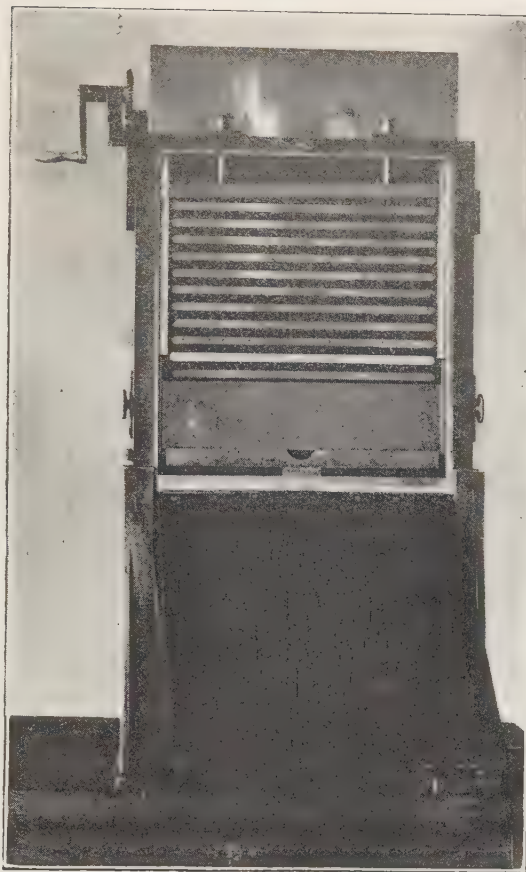


Fig. 2.

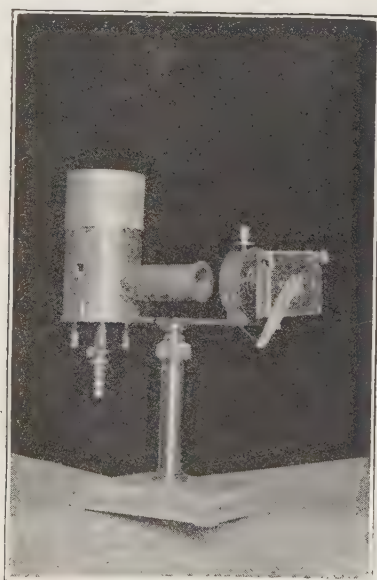


Fig. 10. Opacimetre integrator.

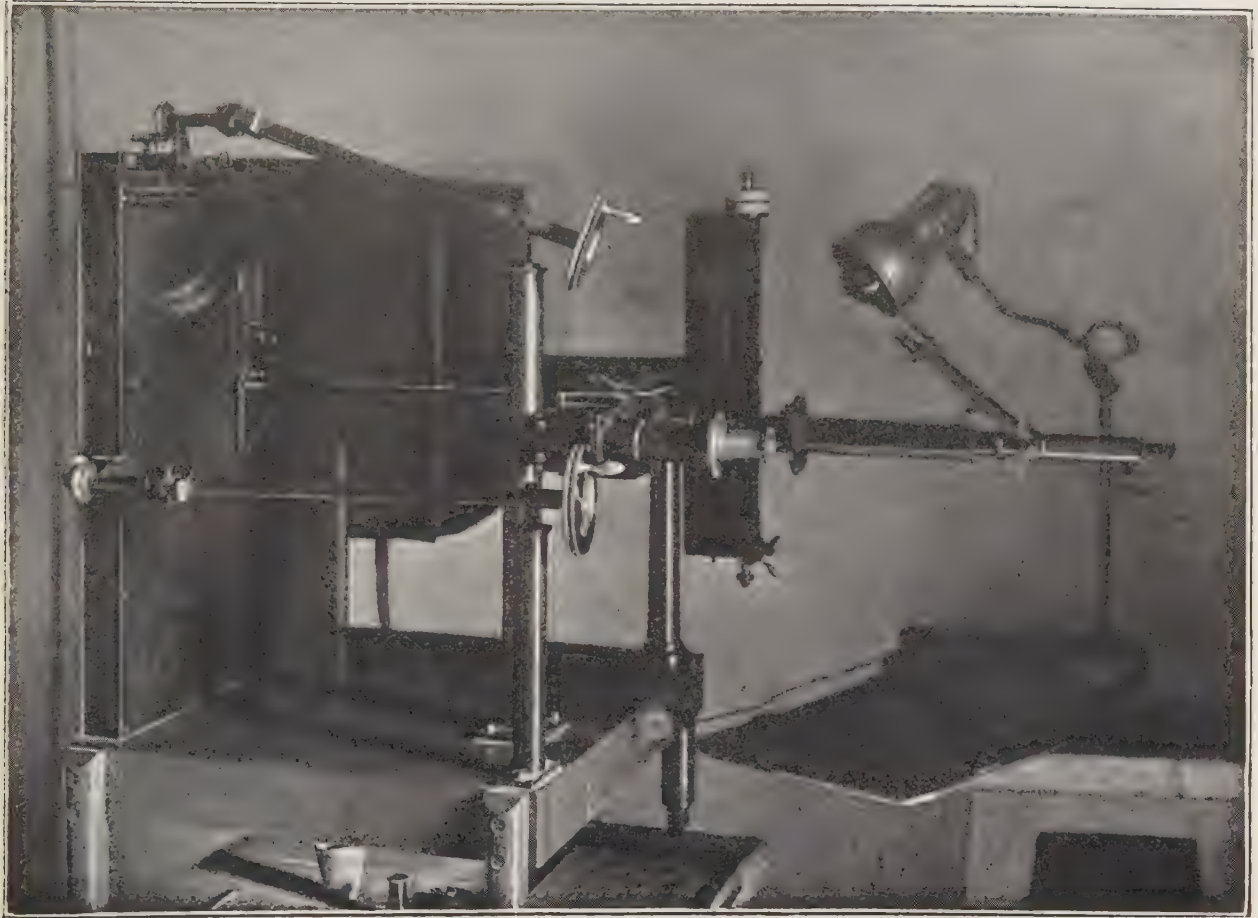


Fig. 5.



Fig. 6.

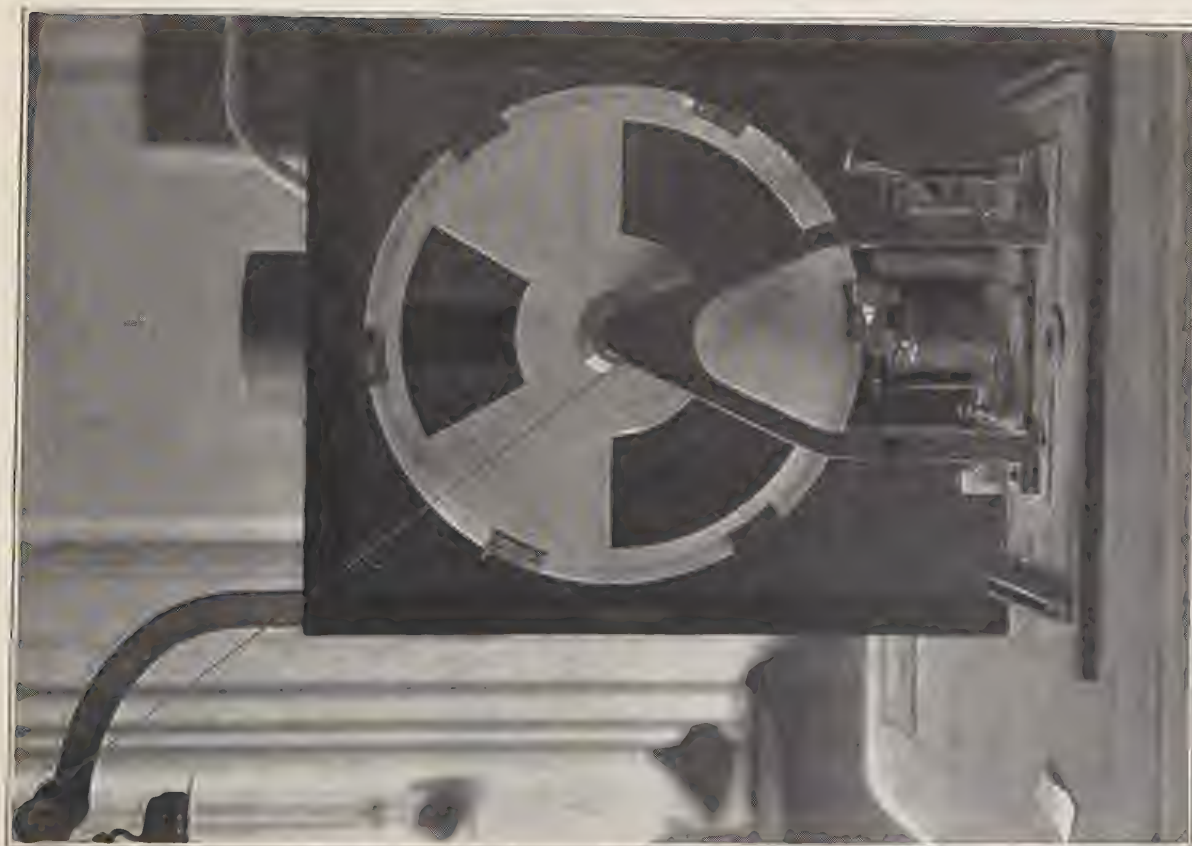


Fig. 3.

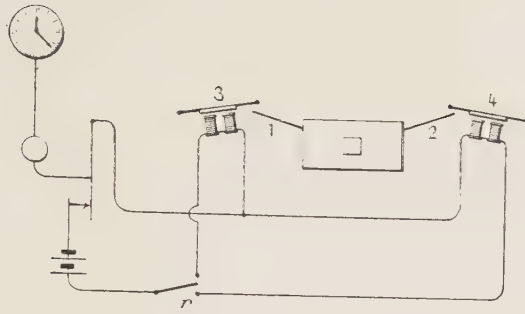


Fig. 4.

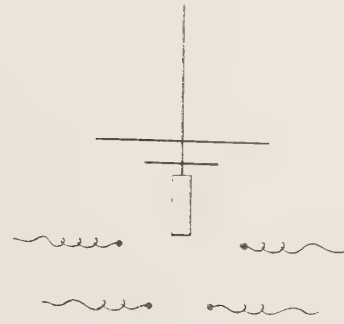


Fig. 7.

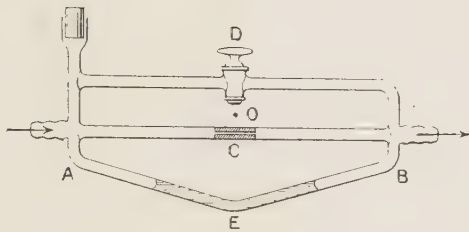


Fig. 8.

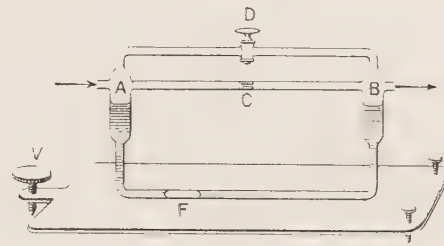


Fig. 9.

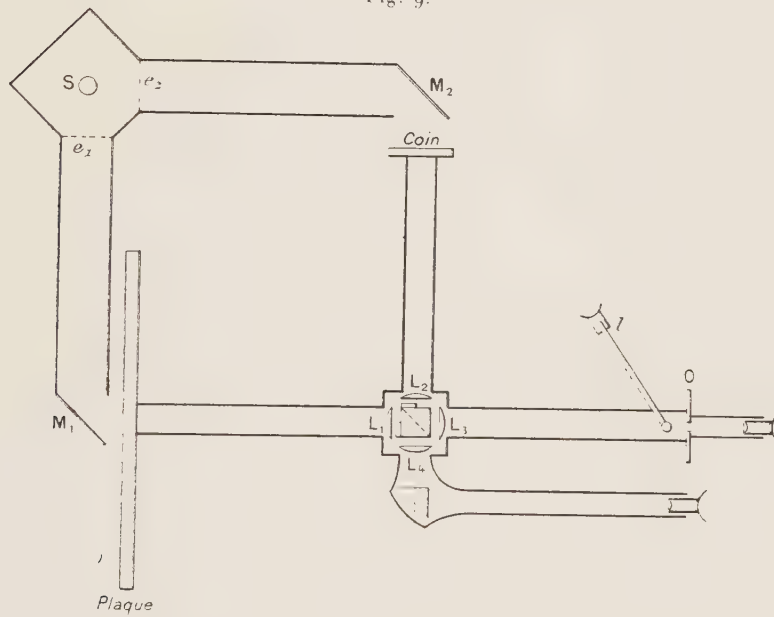


Fig. 11.

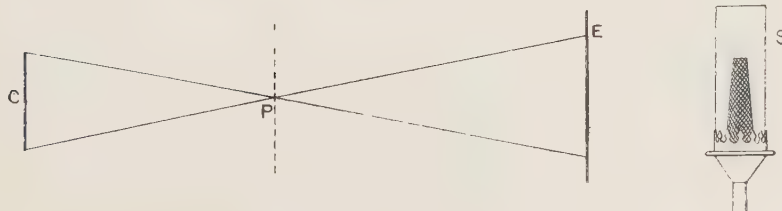


Fig. 12.

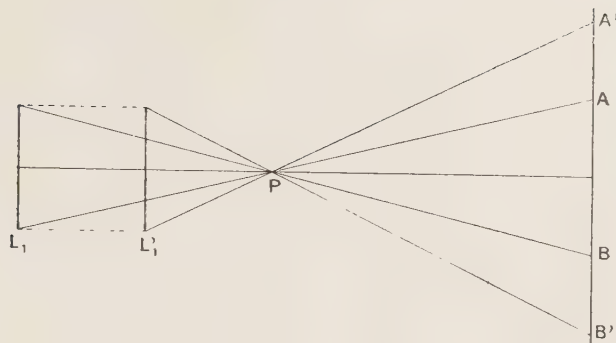


Fig. 13.

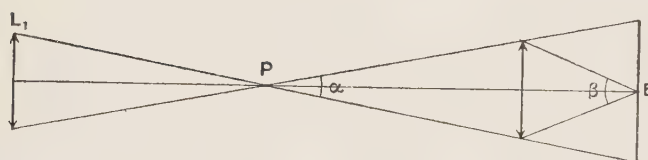


Fig. 15.

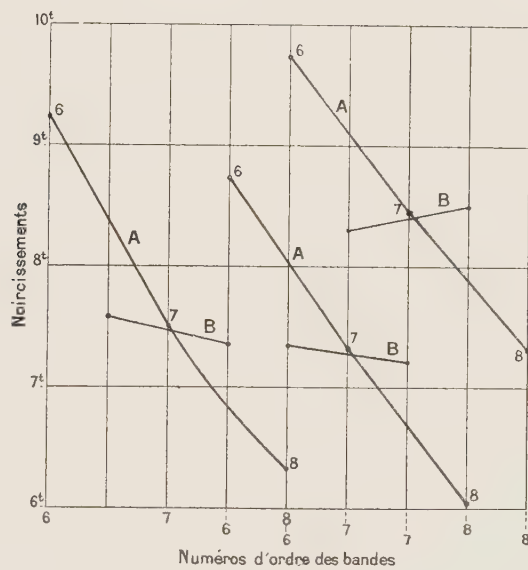


Fig. 14.

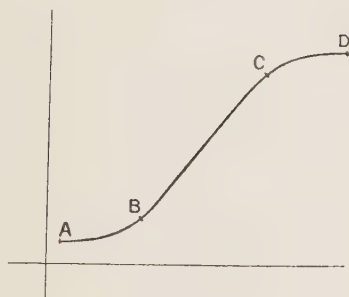


Fig. 16.



Fig. 17.

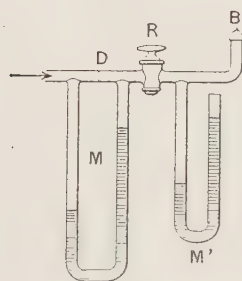


Fig. 18.



Fig. 19.



Fig. 20.



Fig. 21.

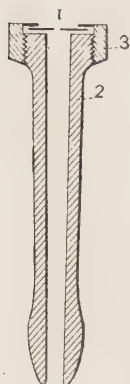


Fig. 22.



Fig. 23.

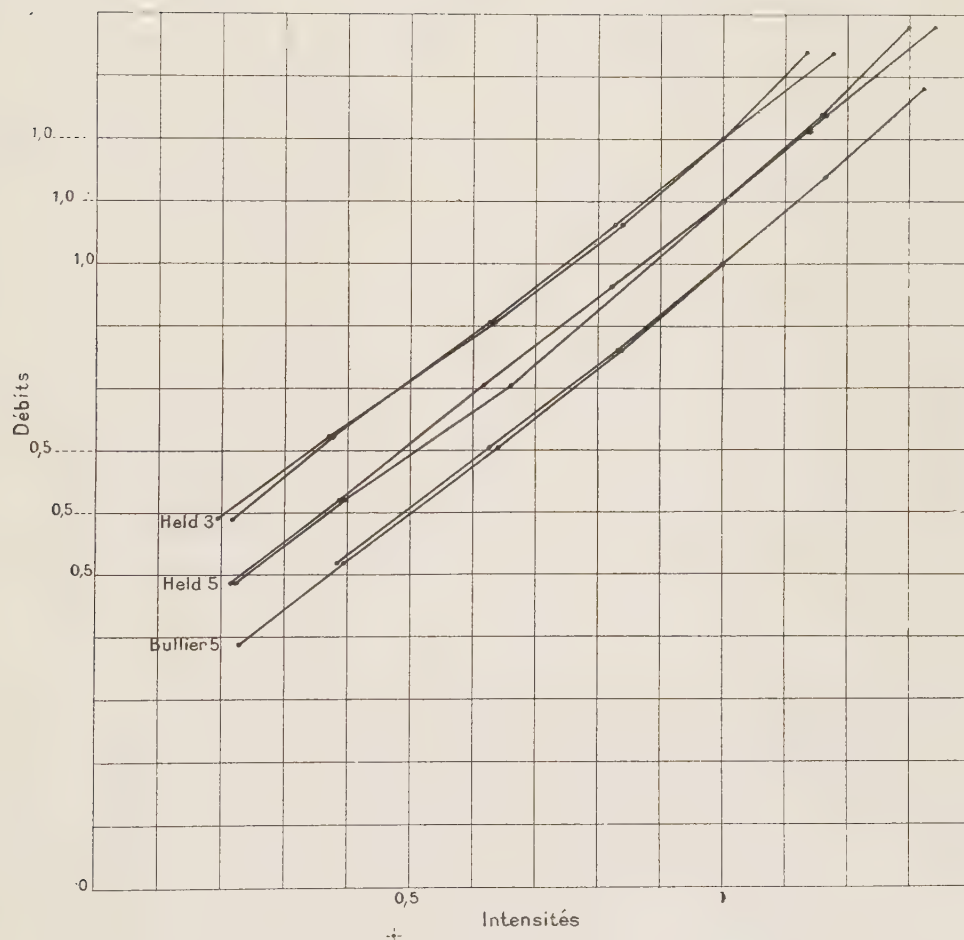


Fig. 24.

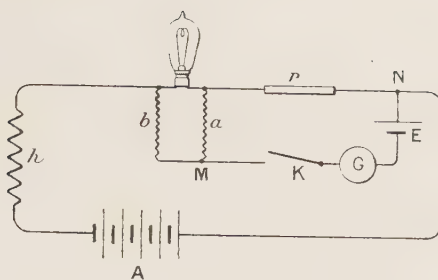


Fig. 25.

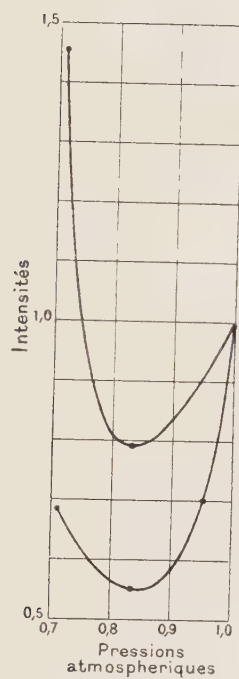


Fig. 26.

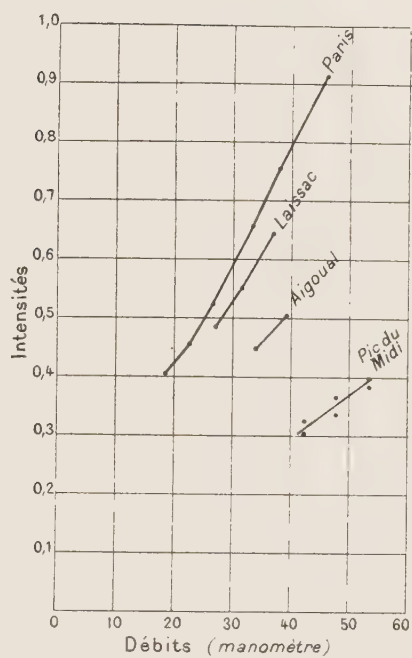


Fig. 27.

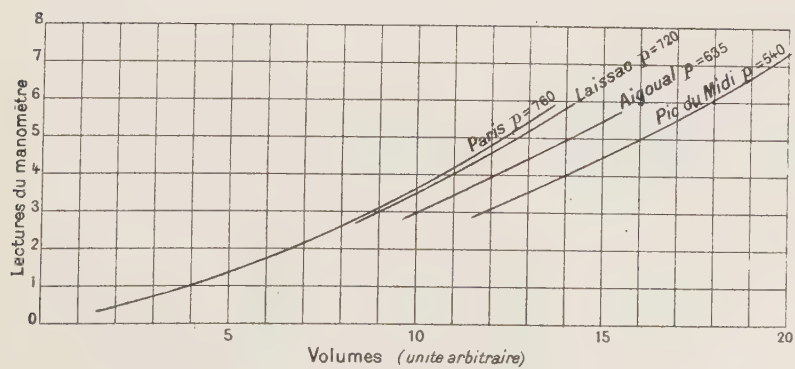


Fig. 28.

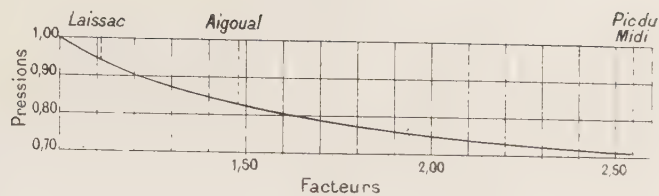


Fig. 29.

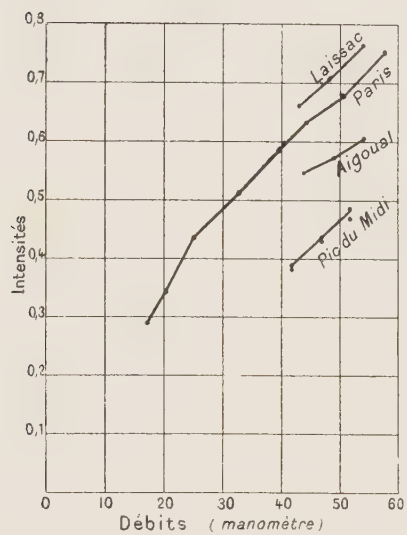


Fig. 30.

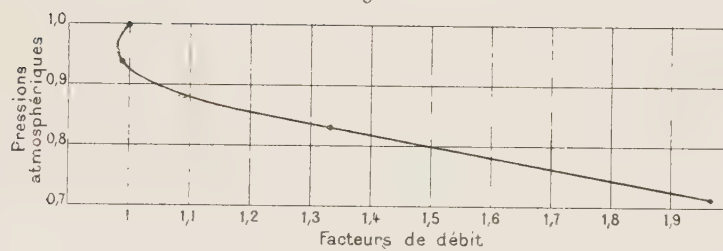


Fig. 31.

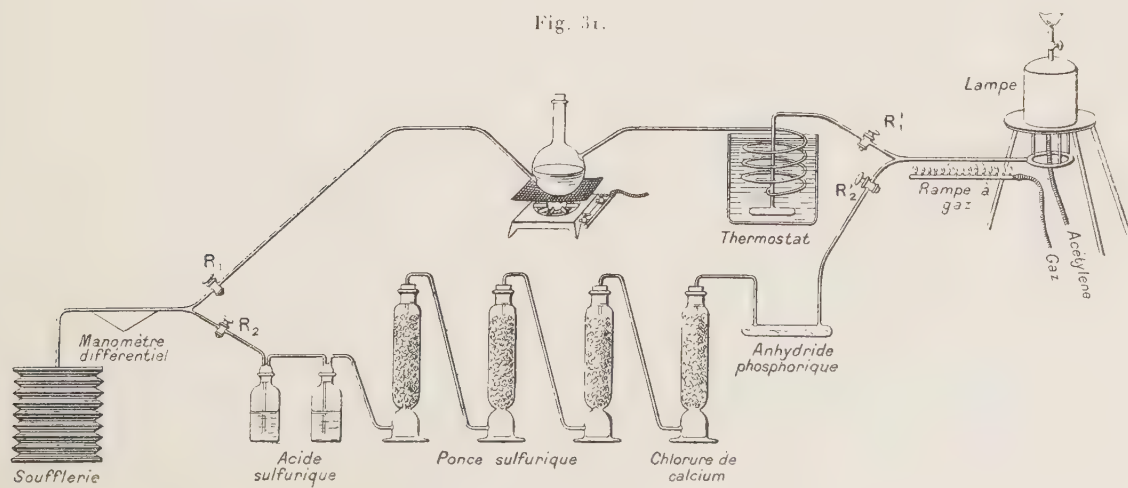


Fig. 32.

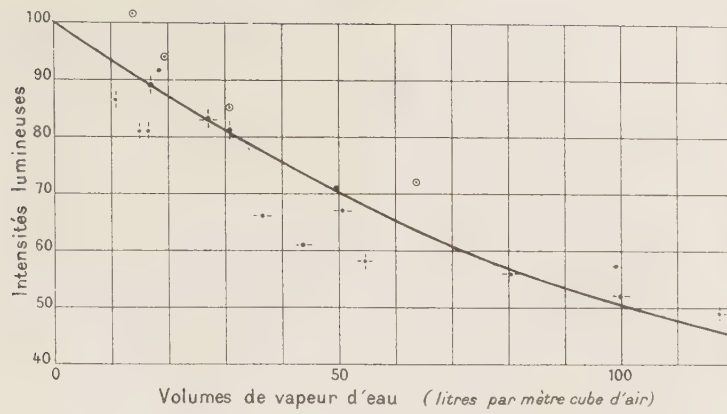


Fig. 33.

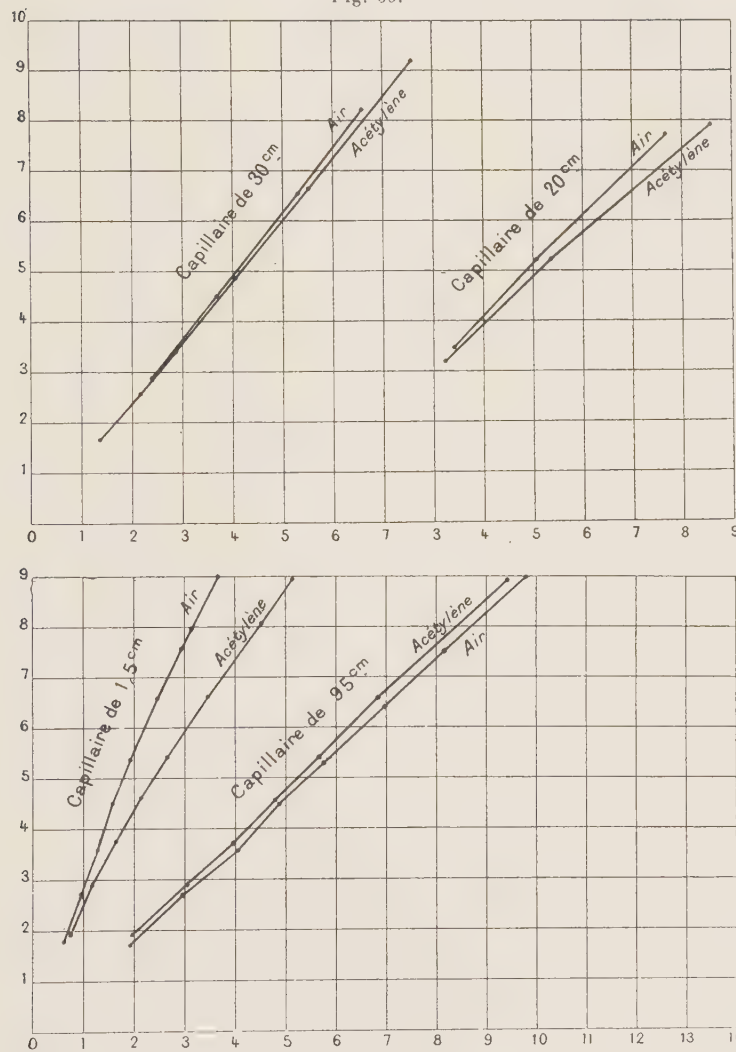
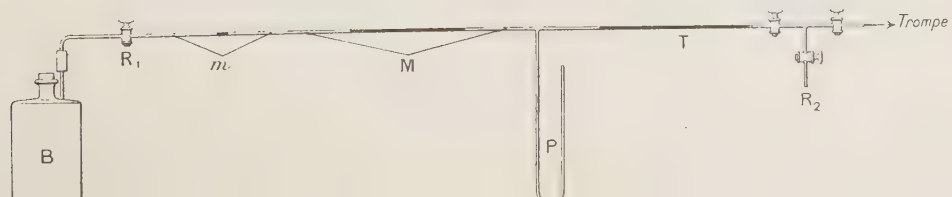


Fig. 34.



SECONDE THÈSE.

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Composition chimique des étoiles.

Vu et approuvé :

Paris, le 2 juillet 1914,

LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES,

PAUL APPELL.

Vu et permis d'imprimer :

Paris, le 2 juillet 1914,

LE VICE-RECTEUR DE L'ACADÉMIE DE PARIS,

L. LIARD.

PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS ET C^e,
55129 Quai des Grands-Augustins, 55
